



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CAMPUS II – AREIA-PB
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA**

PEDRO LUAN FERREIRA DA SILVA

**ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM PLANOSSOLO SOB SISTEMAS DE
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NO AGRESTE DA PARAÍBA**

**AREIA - PB
2019**

PEDRO LUAN FERREIRA DA SILVA

**ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM PLANOSSOLO SOB SISTEMAS DE
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NO AGRESTE DA PARAÍBA**

Trabalho de graduação apresentado à
Coordenação do Curso de Agronomia, do
Centro de Ciências Agrárias, da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

Orientador(a): Prof. Dr. Flávio Pereira de
Oliveira.

**AREIA - PB
2019**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586a Silva, Pedro Luan Ferreira da.

Atributos físicos e químicos de um Planossolo sob sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba / Pedro Luan Ferreira da Silva. - João Pessoa, 2019.

142 f. : il.

Orientação: Flávio Pereira de Oliveira.

Monografia (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Indicadores de qualidade do solo. 2. iLPP. 3. Índice S. 4. Fertilidade do solo. 5. Curva de retenção de água. I. Oliveira, Flávio Pereira de. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

PEDRO LUAN FERREIRA DA SILVA

ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM PLANOSSOLO SOB SISTEMAS DE
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NO AGRESTE DA PARAÍBA

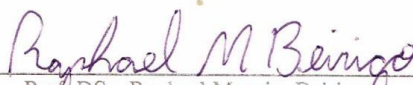
Trabalho de graduação apresentado à
Coordenação do Curso de Agronomia, do
Centro de Ciências Agrárias, da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

Aprovado em: 22 / 10 / 2019.

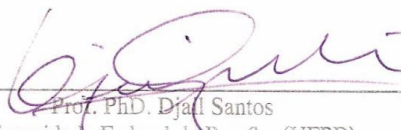
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Flávio Pereira de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Prof. DSc. Raphael Moreira Beirigo
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Prof. PhD. Djal Santos
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

A minha FAMÍLIA, (Pais e irmãs) pela dedicação e apoio incondicional ao longo dessa jornada, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, criador do Universo, pelo dom da vida, da sabedoria e por todo o discernimento que me deu ao longo dessa jornada.

A minha família, em nome de minha mãe Madalena, pai Severino, irmãs Mayara e Mariana, cunhado Jefferson, pelo apoio incondicional.

A meu orientador, professor Flávio Pereira de Oliveira, a quem admiro como profissional e ser humano, exemplo de pessoa. Agradeço pela oportunidade e confiança aemmmim depositada, foram elas que contribuíram para o meu aperfeiçoamento profissional e pessoal.

À Universidade Federal da Paraíba, em nome do Centro de Ciências Agrárias, pelo suporte durante o período de graduação.

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica (PIBIC) a mim concedida.

Aos professores do Curso de Agronomia em nome de Raphael Beirigo, Walter Esfrain Pereira, Djail Santos (UFPB) pelas honrosas contribuições e à Érika Andressa (UFLA), Jocelito Buch (UFPR) e Durval Dourado (ESALQ) pelo suporte durante a construção desse trabalho.

Giliane pela montagem e manutenção do experimento.

Aos grandes amigos que a vida acadêmica me proporcionou e que vou levar para a vida, em especial José Otávio e Robeval Diniz, pelo apoio, companheirismo e suporte. Danilo Dutra e Tales Emanuel.

Aos colegas de laboratório e da vida acadêmica pelos momentos de descontração Heriberto Xavier, Ismael Santos, Elisandra Sousa, Eloyza, Mário César, Adamastor, Igor Gabriel, Juscelino Teixeira, Camila Nóbrega, Edjane, Gislaine, Alícia, Nabor Galvão, Francisco de Assis, Lula, Diego, Flávio Zuza.

“No fim, conservaremos apenas o que amamos.
Amaremos apenas o que compreendemos. E
compreenderemos apenas o que nos ensinaram”

Baba Dioum, Conservacionista Africano

RESUMO

Práticas inadequadas de manejo podem comprometer a qualidade física e química do solo. Nesse sentido, alternativas sustentáveis devem ser adotadas de forma a maximizar a produção de alimentos sem comprometer a qualidade do solo. O sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), torna-se uma alternativa de produção sustentável, pois integra os componentes animal e vegetal em uma mesma área e tem como finalidade principal tornar o solo produtivo sem ocasionar impactos negativos ao ambiente. Nesse sentido, objetivou-se com o presente trabalho avaliar atributos físicos e químicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) no Agreste da Paraíba. O experimento foi implantado no ano de 2015 em área experimental (06°57'00''S e 35°32'42''W; 317 m) da Empresa Paraibana de Pesquisa, Extensão Rural e Regularização Fundiária (EMPAER), no município de Alagoinha (PB). Os tratamentos avaliados foram: BG- Gliricídia (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.) + *Brachiaria decumbens*; BS- Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*) + *Brachiaria decumbens*; BI- Ipê roxo (*Tabebuia impetiginosa*) + *Brachiaria decumbens*; LA- Milho (*Zea mays*) + *Brachiaria decumbens*; BD- *Brachiaria decumbens*, em delineamento de blocos casualizados (DBC), com quatro repetições. Cada parcela possui dimensão de 38 x 20 m, totalizando uma área de 760 m². Amostras de solo com estrutura deformada e indeformada foram coletadas em janeiro de 2019 em três profundidades (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), para a determinação das seguintes variáveis: 1) Físicas: textura, argila dispersa em água, grau de floculação (GF), percentual de macro agregados úmidos e secos (MacroU e MacroS), percentual de micro agregados úmidos e secos (MicroU e MicroS), diâmetro médio ponderado de agregados úmidos e secos (DMPAu e DMPAs), índice de estabilidade de agregados (IEA), índice de estabilidade estrutural (IEE), índice "S", densidade do solo (ρ), densidade máxima do solo (ρ_{MAX}), densidade do solo relativa (ρ_R), grau de compactação estimado (GC_e), condutividade hidráulica saturada (K_0), porosidade total calculada (α) e estimada (α_{Est}), macroporosidade e microporosidade (Ma e Mi), capacidade de aeração do solo (CAS), capacidade de aeração relativa (θ_{CAR}), capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), água disponível (θ_{AD}), capacidade de água disponível (CAD), capacidade de campo relativa (CCr) e curva de retenção de água no solo (CRA); 2) Químicas e de fertilidade: pH em água, carbono orgânico total (COT), estoque de carbono (ESTC), índice de compartimentação de carbono (ICC), estratificação de carbono (ΔEC), taxa de recuperação de carbono (TREC), fósforo (P), potássio (K^+), sódio (Na^+), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}), $Ca + Mg$, alumínio (Al^{+3}), hidrogênio + alumínio ($H^+ + Al^{+3}$), matéria orgânica do solo (MOS), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e índice de saturação por bases (V%). Realizou-se a análise de variância, Teste de Tukey ($p < 0.05$), correlação de Pearson e análise de componentes principais. Não houve variação estatística significativa para a maioria das variáveis físicas e de química e fertilidade entre os tratamentos avaliados; contudo, as variáveis (Ma , S , ρ , ρ_R , Mi e CAS) situaram-se dentro da faixa de limite considerada boa. Houve melhorias significativas para COT e DMPAu, destacando-se os tratamentos BI e BD. Conclui-se que após quatro anos de implantação, os sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta avaliados promoveram melhorias significativas nos atributos microporosidade, diâmetro médio ponderado de agregados úmidos e secos, percentual de macro e microagregados secos e elevação nos teores de matéria orgânica do solo e de carbono orgânico total. As variáveis físico-hídricas foram as mais sensíveis dentro dos sistemas de integração segundo a análise de componentes principais.

Palavras-Chave: Indicadores de qualidade do solo. iLPF. Índice S. Fertilidade do solo. Curva de retenção de água.

ABSTRACT

Improper management practices may compromise the physical and chemical quality of the soil. In this sense, sustainable alternatives should be adopted in order to maximize food production without compromising soil quality. The Crop-Livestock-Forest integration system (iCLF), becomes a sustainable production alternative, as it integrates the animal and plant components in the same area and its main purpose is to make the soil productive without causing negative impacts on the environment. In this sense, the objective of the present study was to evaluate the physical and chemical attributes of a Haplossol under the Crop-Livestock-Forest (iCLF) integration system in Agreste da Paraíba. The experiment was implemented in 2015 in an experimental area (06°57'00"S and 35°32'42"W; 317 m) of the Paraiban Company for Research, Rural Extension and Land Regularization (EMPAER), in the municipality of Alagoinha (PB). The treatments evaluated were: BG- *Gliricidia* (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.) + *Brachiaria decumbens*; BS- Savoy (*Mimosa caesalpinhiifolia*) + *Brachiaria decumbens*; BI- Purple Ipê (*Tabebuia impetiginosa*) + *Brachiaria decumbens*; LA- Corn (*Zea mays*) + *Brachiaria decumbens*; BD- *Brachiaria decumbens*, in a randomized block design (RCB), with four replications. Each plot has a size of 38 x 20 m, totaling an area of 760 m². Soil samples with deformed and undeformed structure were collected at three depths (0.00-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m) to determine the following variables: 1) Physical : texture, water-dispersed clay, flocculation degree (FD), percentage of wet and dry macro aggregates (MacroU and MacroS), percentage of wet and dry microaggregates, weighted average diameter of wet and dry aggregates (WMDWa and WMDda), aggregate stability index (ASI), structural stability index (EEI), "S" index, soil density (ρ), maximum soil density (ρ_{MAX}), relative soil density (ρ_R), estimated compaction degree (CD), saturated hydraulic conductivity (K_θ), calculated (α) and estimated (α_{Est}) total porosity, macroporosity and microporosity (M_a and M_i), soil aeration capacity (SAC), relative aeration capacity (θ_{RAC}), field capacity (θ_{FC}), permanent wilting point (θ_{PWP}), available water (θ_{AW}), available water capacity (WAC), relative field capacity (FCr) and ground water retention curve (WRC); 2) Chemical and fertility: pH in water, total organic carbon (TOC), carbon stock (CSTC), carbon compartmentalization index (CCI), carbon stratification (ΔCE), carbon recovery rate (CRR), phosphorus (P), potassium (K^+), sodium (Na^+), calcium (Ca^{+2}), magnesium (Mg^{+2}), Ca + Mg, aluminum (Al^{+3}), hydrogen + aluminum ($H^+ + Al^{+3}$), soil organic matter (SOM), base sum (BS), cation exchange capacity (CEC) and base saturation index (V%). Variance analysis, Tukey test ($p < 0.05$), Pearson correlation and principal component analysis were performed. There was no statistically significant variation for most physical and chemical variables and fertility between the evaluated treatments; however, the variables (M_a , S, ρ , ρ_R , M_i and SAC) were within the limit range considered good. There were significant improvements for COT and WMDWa, especially the BI and BD treatments. It was concluded that after four years of implementation, the evaluated integrated Crop-Livestock-Forestry systems promoted significant improvements in the attributes microporosity, weighted average diameter of wet and dry aggregates, percentage of dry macro and microaggregates and elevation in the organic matter contents. soil and total organic carbon. The physical-water variables were the most sensitive within the integration systems according to principal component analysis.

Keywords: Soil quality indicators. iCLF. S Index. Soil fertility. Water retention curve.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Percentual de áreas por região com sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) no Brasil	18
Figura 2 - Perfil de Planossolo Háplico da área experimental em Alagoinha, PB	28
Figura 3 - Sistema iLPF, destacando-se as parcelas experimentais com lavoura anual. (A) Parcela experimental com soja e (B) parcela experimental com amendoim e componente arbóreo ao fundo.....	33
Figura 4 - Disposição das parcelas experimentais com os tratamentos no iLPF, em Alagoinha (PB)	34
Figura 5 - Representação esquemática dos pontos de coleta na parcela experimental	35
Figura 6 - Curva de retenção de água no solo para um Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba. (0.00-0.10 m)	65
Figura 7 - Curva de retenção de água no solo para um Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba. (0.10-0.20 m)	68
Figura 8 - Curva de retenção de água no solo para um Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba. Camadas (0.00-0.10 e 0.10-0.20 m).	71
Figura 9 - Capacidade de água disponível Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba. Camadas (0.00-0.10 e 0.10-0.20 m).	73
Figura 10 - Correlação linear entre atributos físicos de solo e índice “S” para Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba.	81
Figura 11 - Estratificação de carbono em Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no Agreste da Paraíba	91
Figura 12 - Diagrama de autovetores para atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no Agreste da Paraíba	101
Figura 13 - Diagrama de autovetores para atributos físico-hídricos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no Agreste da Paraíba.....	104
Figura 14 - Diagrama de autovetores para atributos químicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no Agreste da Paraíba....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização física do Planossolo Háplico antecedente a implantação do experimento	31
Tabela 2 - Caracterização química e de fertilidade do Planossolo Háplico antecedente a implantação do experimento	31
Tabela 3 - Espécies arbóreas implantadas na área experimental, correção do solo e adubação	32
Tabela 4 - Descrição do componente lavoura-anual implantada na área experimental ...	32
Tabela 5 - Textura e grau de floculação em Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba	46
Tabela 6 - Distribuição de poros e capacidade de aeração em Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba	49
Tabela 7 - Densidades (real, máxima, relativa), grau de compactação e condutividade hidráulica saturada em Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba	55
Tabela 8 - Distribuição, diâmetro médio ponderado e índice de estabilidade de agregados em um Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no Agreste da Paraíba	60
Tabela 9 - Parâmetros de ajustes da curva de retenção para um Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba (0.00-0.10 m)	66
Tabela 10- Parâmetros de ajustes da curva de retenção para um Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba (0.10-0.20 m).	69
Tabela 11- Parâmetros de ajustes da curva de retenção para um Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba. Camadas (0.00-0.10 e 0.10-0.20 m)	72
Tabela 12- Capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível e índice “S” em um Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba.	74
Tabela 13- Teor, estoques, taxa de recuperação, compartimentação de carbono e índice de estabilidade estrutural de Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no Agreste da Paraíba.....	85

Tabela 14- Atributos químicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba.....	93
Tabela 15- CTC, V, pH, SB e MOS em Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba.....	97
Tabela 16- Análise de componentes principais (ACP) para atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba.....	100
Tabela 17- Análise de componentes principais (ACP) para parâmetros físico-hídricos e curva de retenção de água no solo para um Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba.....	103
Tabela 18- Análise de componentes principais (ACP) para atributos químicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba	106
Tabela 19- Correlação de Pearson para atributos físicos de Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba. (0.00- 0.10 m)	109
Tabela 20- Correlação de Pearson para atributos físicos de Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba. (0.10 – 0.20 m)	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Agricultura de Baixo Carbono
CC	Capacidade de Campo
COT	Carbono orgânico total
CTA	Capacidade de Troca Aniônica
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CO ₂ eq	Dióxido de Carbono equivalente
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMPAER	Empresa Paraibana de Pesquisa, Extensão Rural e Regularização Fundiária
FBN	Fixação Biológica de Nitrogênio
GEE's	Gases causadores do efeito estufa
iLP	Integração lavoura-pecuária
iLPF	Integração lavoura-pecuária-floresta
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MOS	Matéria orgânica do solo
PB	Paraíba
PD	Plantio Direto
PMP	Ponto de murcha permanente
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade
%	Porcentagem
Ψ	<i>Psi</i> = Potencial matricial
θ	<i>Theta</i> = umidade volumétrica
α	<i>Alpha</i> = Porosidade total
S	Índice S
Σ	<i>Sigma</i> = Somatório
Z	Profundidade
p	Significância
<	Menor que
>	Maior que
\leq	Menor ou igual
\geq	Maior ou igual
=	Igual a
π	<i>Pi</i> = 3,141592
Δ	Variação
\$	Cifrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Degradação física e química do solo nos sistemas convencionais de produção agropecuária	14
2.2	Plano ABC e os sistemas integrados de produção agropecuária	17
2.3	Efeitos da adoção dos sistemas integrados de produção agropecuária na melhoria física e química dos solos	19
2.4	Indicadores de qualidade física e química do solo	21
2.5	Planossolos: Caracterização, uso e manejo	27
2.6	Objetivos	30
2.6.1	<i>Geral</i>	30
2.6.2	<i>Específicos</i>	30
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1	Caracterização da área experimental	30
3.2	Histórico de uso da área experimental	31
3.3	Delineamento experimental	33
3.4	Coleta e preparo das amostras	34
3.5	Variáveis analisadas	35
3.5.1	<i>Variáveis físicas</i>	35
3.5.2	<i>Variáveis de química e fertilidade</i>	36
3.6	Procedimentos Metodológicos	36
3.6.1	<i>Variáveis físicas</i>	36
3.6.2	<i>Variáveis de química e fertilidade</i>	43
3.7	Análise estatística dos dados	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1	Análise multivariada dos dados (ACP)	99
4.2	Análise de correlação de Pearson	108
5	CONCLUSÕES	113
	REFERÊNCIAS	114

1 INTRODUÇÃO

A produção de alimentos é um dos grandes desafios da humanidade e tecnologias cada vez mais modernas têm sido adotadas para obter produção em quantidade e qualidade suficientes para alimentar a população do planeta (KLEIN et al., 2007), um vez que as tecnologias tradicionais não garantem uma produção economicamente sustentável sem ocasionar a degradação, física, química e biológica do solo (SILVA, 2017).

No Brasil, um dos principais desafios enfrentados pela produção agropecuária é a degradação dos solos (BARROS et al., 2018), que em grande parte é ocasionada pelo preparo convencional contínuo, o pisoteio animal, o tráfego intenso de máquinas e implementos agrícolas, supressão da cobertura vegetal e falta de manejo das pastagens (LANZANOVA et al., 2007; SANTOS et al., 2011). Esses fatores não só comprometem a sustentabilidade da produção de alimentos, como também, reduzem a habilidade do solo em manter efetivamente os serviços ecossistêmicos essenciais para o desenvolvimento da humanidade (STEFANOSKI et al.; 2013; NASCIMENTO et al., 2019).

Os prejuízos financeiros ocasionados pela degradação do solo são imensuráveis, pois ressalta-se que todos os anos são perdidas de 25 a 40 bilhões de toneladas solo da camada arável por ano através de processos erosivos, que inviabilizam as atividades agrícolas (FAO 2015; ALVES et al., 2016) e colocam em risco a segurança alimentar e nutricional da humanidade por reduzir de forma drástica as áreas agricultáveis e a sua capacidade de regeneração natural (UNCCD, 1994).

Nesse contexto, manter a qualidade do solo, ou mesmo obter melhorias através de sistemas de produção sustentáveis, tornam-se imprescindíveis para elevar a segurança alimentar e nutricional sem comprometer o equilíbrio entre as condições químicas, físicas e biológicas do solo (SANTOS et al., 2019; COSTA; DRESCHER, 2018). Na tentativa de buscar equilíbrio entre a produtividade agrícola com a conservação do meio ambiente, nas últimas décadas tem se desenvolvido novos conceitos agrícolas com base na conservação dos solos, na ciclagem de nutrientes e diversificação de culturas (SILVA et al., 2011).

Dentre esses novos conceitos de produção, os sistemas integrados de produção como a integração lavoura-pecuária (iLP), integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF), sistema plantio direto (PD) e agroflorestais (SAFS), têm sido adotados em substituição aos sistemas convencionais de produção, pois, além dos inúmeros benefícios que promovem ao solo, elevam a produção de alimentos e reduzem de forma satisfatória o impacto negativo ao meio ambiente (LOSS et al., 2009; SILVA et al., 2011; NICODEMO et al., 2018).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DEGRADAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO NOS SISTEMAS CONVENCIONAIS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

A degradação do solo é dividida em duas fases, a primeira de ordem econômica, denominada como degradação agrícola e a segunda de ordem edáfica, também conhecida como degradação biológica do solo (WADT et al. 2003). Na primeira fase, o sistema apresenta perda de produtividade em consequência da competição por plantas daninhas e infestação de patógenos e, na segunda, observa-se diminuição da capacidade de produção de biomassa vegetal, perda de nutrientes e matéria orgânica, aumento da acidez, compactação e erosão (WADT, 2003; SALIMON, 2003). Esta última ocasiona não só a degradação biológica do solo, como também a química e a física.

A degradação física, é uma das mais importantes dentro dos sistemas de produção agropecuária, pois está relacionada a processos estáticos e dinâmicos imprescindíveis ao desenvolvimento dos vegetais. A compactação do solo é um desses processos e se caracteriza pelo decréscimo de volume de solos não saturados, quando uma pressão externa é aplicada sobre ele, ocasionando o rearranjo das partículas constituintes (LIMA, 2004; RICHART et al., 2005; CAMARGO; ALLEONI, 1997). Enquadra-se como um dos processos degradativos mais limitante para a produção agropecuária, principalmente nos sistemas convencionais de produção.

Vários são os problemas físicos relacionados a compactação do solo, destacando-se a redução na disponibilidade de água, nutrientes e oxigênio às plantas (BALBINOT JÚNIOR et al., 2009), aumento de densidade, redução da distribuição e tamanho de poros (BORTOLINI et al., 2016), comprometimento à infiltração de água (SMUCKER; ERICKSON, 1989; MORAES, 1991; HILLEL, 1998), além de retardar o desenvolvimento das culturas em função do sistema radicular superficial (PIFFER; BENEZ, 2009; SANTOS et al., 2018).

Outro atributo físico que pode ser utilizado como um indicador de compactação e degradação do solo é a densidade do solo, que corresponde à relação existente entre a massa e o volume do solo (SECCO, 2003), sua dinâmica pode interferir no desenvolvimento dos vegetais, contudo de forma indireta (DIAS, 2014), pois exerce influência sobre a superfície de contato entre as raízes e o solo, reduzindo a absorção de água e nutrientes.

Contudo, a sua intensidade de ação sobre o desenvolvimento das plantas, vai depender do gradiente textural do solo, como observado por Souza et al. (2005); para estes a densidade

do solo de $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ passa a ser limitante ao desenvolvimento das plantas e se acentua com o decréscimo do teor de argila do solo. Rosa et al. (2019) avaliando o desenvolvimento inicial do trigo em função de diferentes valores de densidade do solo, observaram efeitos negativos sobre as plantas, destacando-se a menor produção de matéria seca da parte aérea, menor altura das plantas e baixo desenvolvimento do sistema radicular.

A densidade do solo torna-se portanto um atributo sensível as práticas de manejo do solo e a sua avaliação deve entrar na rotina das análises de solo, de forma que possa se reduzir, através de técnicas de mitigação, o seu impacto sobre o desenvolvimento das plantas. Contudo, os solos apresentam grande amplitude de densidade em função de suas características mineralógicas, de textura e teor de matéria orgânica (MARCOLIN; KLEIN, 2011), sendo mais pronunciadas em solos arenosos e decrescem nos solos com maiores concentrações de silte e argila (BUENO; VILLAR, 1998; LIBARDI, 2005).

Erroneamente, chega-se a pensar que os solos argilosos apresentam maior densidade que os solos arenosos, em função do teor de argila e da coesão e adesão que existe entre as partículas. Essas propriedades passam a definir o sistema de manejo do solo, em função do grau de resistência que passam a apresentar à tração (CENTENO et al., 2017). Porém, nos solos argilosos, a agregação das partículas resulta na formação de agregados com grande porosidade, também conhecida como porosidade intra-agregados, que aumenta o volume de espaços porosos, principalmente os de tamanho reduzido (BRADY; WEIL, 2008), reduzindo de forma significativa a sua densidade.

Para Lima et al. (2006), a degradação do solo se torna necessária quando se deseja produzir de forma a obter altos níveis de produtividade e com baixos custo de produção; sendo necessário acompanhar de forma corriqueira as mudanças de uso do solo e suas possíveis implicações para a sustentabilidade da produção agropecuária. Para minimizar esse processo, durante a fase de planejamento do plantio, deve-se criar condições estruturais favoráveis ao desenvolvimento e crescimento das plantas, tanto da parte aérea, quanto das raízes (BOTTEGA et al., 2011; CORTEZ et al., 2018).

Nos sistemas intensivos de produção, as menores respostas à adubação observadas nos solos brasileiros, com anos de cultivos, em boa parte estão relacionadas à degradação física dos solos (NOVAIS; SMITH, 1999; MOREIRA et al., 2016), pois afeta consideravelmente a área de contato entre as raízes das plantas e a solução do solo com os nutrientes. Para que haja uma boa resposta à adubação, necessita-se que haja o mínimo de impedimentos físicos no solo, de forma a reduzir os obstáculos ao crescimento das raízes (CAMARGO; ALLEONE, 1997).

Existe uma relação entre as propriedades do solo que podem afetar o desenvolvimento dos vegetais e ocasionar prejuízos econômicos. A matéria orgânica é um dos atributos químicos mais sensíveis às mudanças de manejo do solo, e alterações na sua dinâmica influenciam diretamente na conservação do meio ambiente, pois afetam a infiltração e retenção de água, suscetibilidade à erosão, complexação de elementos tóxicos e estruturação do solo (CONCEIÇÃO et al., 2005).

A matéria orgânica do solo é subdividida em frações, que apresentam diferentes taxas de permanência no solo, a exemplo da fração lábil, que apresenta alta taxa de decomposição em um curto período de tempo, fornecendo nutrientes às plantas e energia aos microrganismos (SILVA; MENDONÇA, 2007) e a fração humificada, que representa dois terços (2/3) do carbono presente no solo e sua função é atuar nas condições químicas e físicas do solo, além de atuar no sequestro de carbono (SILVA; MENDONÇA, 2007; SILVA et al., 2011).

Contudo, se aplicado de forma inadequada, o sistema de uso do solo pode comprometer a perda de matéria orgânica para o ambiente, através de elevação em sua taxa de decomposição. Uma prática que eleva a decomposição da matéria orgânica do solo em sistemas convencionais de produção é o revolvimento do solo, com posterior aplicação de corretivos e fertilizantes, que ocasionam perturbação no solo e estimulam a ação de microrganismos decompositores (BAYER et al., 2000). Para fins de comparação, a perda de matéria orgânica do solo é duas vezes maior em sistemas de produção onde o solo é revolvido, em relação aos sistemas de produção onde se adota o plantio direto (BAYER et al., 2000; FARIA et al., 2008).

Essa ação acaba não só comprometendo a qualidade física, química e biológica do solo, como também contribui de forma direta para o aquecimento global, em função da emissão de CO₂ para a atmosfera (URQUIAGA et al., 1999). A perda rápida de carbono para o sistema é um processo com consequências de grande impacto, pois além de favorecer a emissão de gases do efeito estufa para a atmosfera, contribui de forma direta para a degradação do solo em função da perda de biodiversidade e da persistência de processos erosivos (SANTOS et al., 2019).

A degradação do solo provocada pela perda de matéria orgânica favorece o empobrecimento químico do solo, através da lixiviação de elementos como cálcio, magnésio, potássio e fósforo em seus teores trocáveis, como também a perda de ácido fúlvico para o ambiente (SCHAEFER et al., 2002). Para Dechen et al. (2015), em termos financeiros o custo com a perda de fertilizantes em solos mal manejados varia de U\$\$ 107,76 ha⁻¹ ano⁻¹ no solo sem cobertura, para U\$\$ 18,15 ha⁻¹ ano⁻¹ em um solo com uma taxa de cobertura de 90%.

Salienta-se então, a necessidade de adotar sistemas conservacionistas de produção agropecuária, que aliem a produção de alimentos, em consonância com a preservação ambiental

e redução de custos. Para crescer as plantas necessitam de um solo com boa estrutura, que permita a obtenção de água e nutrientes e com suficiente espaço poroso para o fornecimento adequado de oxigênio (POTT et al., 2018).

2.2 PLANO ABC E OS SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

O plano setorial de mitigação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia com baixa emissão de carbono na agricultura, mais conhecido como Plano ABC, foi implantado através do Decreto Federal número 7.390/ 2010 e tem por finalidade organizar e planejar as ações a serem realizadas para a adoção de tecnologias sustentáveis e redução da emissão de gases do efeito estufa (GEEs) pela agropecuária nacional (MAPA, 2019).

Esse plano foi projetado para ter uma extensão de 10 anos, de 2010 até 2020, sendo composto por sete programas centrais. 1) Recuperação de pastagens degradadas; 2) Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFS); 3) Sistema Plantio Direto (SPD); 4) Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN); 5) Florestas plantadas; 6) Tratamento de dejetos de animais; 7) adaptação às mudanças climáticas.

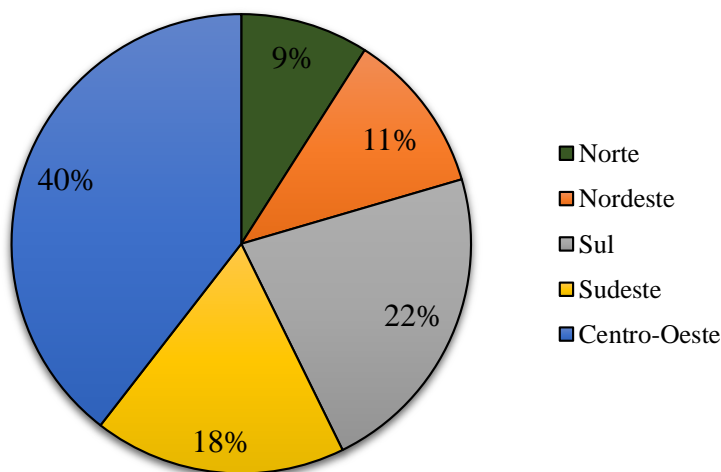
Os sistemas integrados de produção agropecuária, como a integração lavoura-pecuária-floresta, juntamente com o plantio direto, foram os sistemas com maior taxa de expansão nos últimos anos. Estimativas de campo apontam que entre a safra 2015/2016 existia no Brasil 11.468.124 hectares com sistemas integrados de produção agropecuária (REDE ILPF, 2019) com tendência de aumento de mais 5 milhões de hectares até o ano de 2030 (PEREIRA et al., 2018), tendo os estados da região Centro-Oeste, 40% de todo o montante de áreas implantadas com sistemas de integração (Figura 1).

O Nordeste brasileiro tem avançado na implantação desses sistemas, voltado, principalmente, para a realidade climática vivenciada pela região. Segundo estimativas da Rede ILPF (2019), a região Nordeste possui atualmente 1.312.138 hectares com sistemas integrados de produção agropecuária, e a Paraíba destaca-se nesse meio com 136.217 hectares.

A integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) é um sistema de produção agropecuária que integra os componentes agrícola, pecuário e florestal em rotação, consórcio ou sucessão, dentro de uma mesma área de produção ao longo do ano (NICODEMO et al., 2018). Dentre os inúmeros benefícios já comprovados pela pesquisa científica, os sistemas de integração contribuem para a redução do impacto ambiental, aumento de rentabilidade para o produtor

rural, recuperação de pastagens degradadas e improdutivas, além de diminuir o risco financeiro (REDE ILPF, 2019).

Figura 1. Percentual de áreas por região com sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) no Brasil.



Fonte: Rede ILPF (2019).

No quesito meio ambiente, estimativas apontam que os 11,5 milhões de hectares já implantados foram responsáveis pela fixação de 35,1 milhões de toneladas de CO₂eq e aumento de 12 a 13% nos teores de matéria orgânica do solo (REDE ILPF, 2016), tornando o iLPF um sistema de produção ambientalmente sustentável, tanto do ponto de vista ambiental, quanto econômico.

Na região Nordeste, a implantação dos sistemas integrados de produção agropecuária é incipiente, contudo, apresenta-se como uma excelente ferramenta de produção agropecuária, devido, principalmente da grande variabilidade climática apresentada na região. Os modelos produtivos disponíveis para serem implantados na região são os mais variados, contudo, o foco principal das equipes de transferência de tecnologia é manejar de forma racional os recursos florestais disponíveis, consorciando com espécies exóticas adaptadas às condições edafoclimáticas da região (RANGEL et al., 2016). Ainda segundo o mesmo autor, nas mesorregiões da Zona da Mata e Agreste nordestinos, um sistema que tem se mostrado bastante eficiente na recuperação de áreas degradadas é o consórcio da gliricídia (*Gliricidia sepium*)

com milho e *Brachiaria brizantha*, contribuindo para a melhoria na produção de carne em áreas onde antes as pastagens apresentavam baixa capacidade de suporte.

A região Nordeste apresenta uma curta estação chuvosa, o que limita a produção de palhada para implantação de sistemas de plantio direto e posterior conservação dos solos (SOFFIATI, 2016). A implantação de sistemas integrados de produção, como foco nos mais simples, no caso da integração lavoura-pecuária (iLP), pode ser uma alternativa para reversão desse processo, deixando quantidades significativas de palha na superfície e raízes no perfil do solo (ZONTA et al., 2016). Segundo estes autores, isso resulta no aumento do teor de matéria orgânica ao longo do tempo, que é fundamental para a melhoria das características físicas e químicas do solo, pois as raízes das gramíneas forrageiras penetram de forma agressiva no solo, favorecendo a atividade microbiológica e a infiltração de água.

Na parte química, os sistemas de integração promovem melhorias nos indicadores de qualidade do solo, calcadas no aumento de pH, redução de elementos tóxicos às plantas, além de garantir maior permanência de material orgânico em superfície favorecendo o aporte de carbono orgânico ao solo (IWATA et al., 2012). Apesar dos resultados em nível de Brasil, muito ainda deve ser feito, quando se fala de sistemas integrados de produção, principalmente no que se refere ao avanço de conhecimento e transferência de tecnologias, pois apresentam alta complexidade, diversidade e sinergia entre componentes (FARIAS NETO et al., 2019).

No estado da Paraíba, as pesquisas tem avançado, principalmente no que diz respeito a avaliação de indicadores físicos de qualidade do solo sob sistemas integrados de produção, como observado em trabalhos de Silva et al. (2018). Contudo, há muito ainda a ser feito, de forma a escolher os sistemas mais adequados para a realidade edafoclimática da região, buscando respostas principalmente sobre a ação dos sistemas integrados de produção (iLP) e (iLPF) a longo prazo sobre as melhorias físicas, químicas e biológicas do solo.

2.3 EFEITOS DA ADOÇÃO DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NA MELHORIA FÍSICA E QUÍMICA DOS SOLOS

Os sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta são mecanismos de grande importância para a recuperação de áreas degradadas, visto que possibilita o uso da terra através de uma sinergia existente entre espécies vegetais e animais, possibilitando de modo sustentável, uma maior produção por área (BALBINO et al., 2011). Os sistemas integrados de produção agropecuária buscam o aumento da MOS e promovem melhorias nas propriedades físicas,

químicas e biológicas do solo, possibilitando um aumento na produtividade e redução de gastos com irrigação, fertilizantes, condicionadores de solo e outros insumos agrícolas (CONCEIÇÃO et al. 2019).

Para os agroecossistemas os benefícios são inúmeros, destacando-se o favorecimento à infiltração e retenção de água no solo, incremento de carbono orgânico, além de favorecer o desenvolvimento do sistema radicular dos vegetais (PEZARICO et al. 2013). Ocorre também um aumento na ciclagem de nutrientes, com substancial melhoria na biota e fertilidade do solo, aumento da porosidade total e da agregação do solo (CONTE et al., 2011; LOSS et al., 2014), favorece a diminuição da densidade do solo e do grau de compactação (MACEDO, 2009). Estes resultados foram verificados por Carvalho et al. (2004), comparando atributos físicos de solo entre um sistema de produção convencional e uma área com sistema agroflorestal.

Os sistemas integrados de produção atuam no incremento e manutenção dos teores de matéria orgânica, que favorecem a complexação de elementos tóxicos, a capacidade de troca de cátions, como agentes cimentantes na estrutura do solo e poder tampão sobre o pH (COGO et al., 2013). Apesar de alguns questionamentos sobre os possíveis efeitos negativos que os sistemas de integração podem promover ao solo ao longo do tempo como compactação do solo e aumento de densidade, autores como Souza et al. (2010), Muniz et al. (2011), Oliveira et al. (2011) e Vilela et al. (2011), observaram aumento de fitomassa, diminuição na lixiviação de nutrientes e aumento na biomassa microbiana do solo em sistemas de integração consolidados.

A adoção de sistemas de produção que favoreçam a conservação do solo, tendem a aumentar a condutividade hidráulica próximo à superfície do solo, que quando aliada a composição granulométrica e ao teor de matéria orgânica, favorecem maior retenção e disponibilidade de água para as plantas (SILVA et al., 2005; SILVA et al., 2017), além de promover melhorias no estoque de carbono.

A cobertura vegetal mantida sobre a superfície do solo reduz os impactos negativos ocasionados pela compressão mecânica, seja ela promovida pelo pisoteio animal ou pelo uso inadequado de máquinas e implementos agrícolas. Estudos comprovam que a compressão mecânica aplicada sobre o solo ocasiona menos danos físicos, quando o mesmo apresenta teores consideráveis de cobertura (verde ou seca), como observado por Moreira et al. (2012). Eles constataram que, após oito anos de implantação do sistema iLPF, o pisoteio animal não alterou a porosidade de aeração e a permeabilidade do solo ao ar em relação à área sem pastejo. Contudo, vale ressaltar que de nada adianta a presença destas plantas se o produtor não respeitar a capacidade de suporte animal, uma vez que altas taxas de lotações podem comprometer a qualidade física do solo (PETEAN, et al. 2010).

No que diz respeito à fertilidade, observa-se melhorias na disponibilidade de fósforo em sistemas de produção que adotam a integração lavoura-pecuária-floresta, devido à manutenção da cobertura permanente sobre o solo, que atua sobre a adsorção do mesmo através da liberação de ânions orgânicos que competem pelos mesmos sítios de absorção (RHEINHEIMER, 2000). Cassol (2003) concluiu que a decomposição de ligantes de baixo peso molecular, proveniente da MOS depositada ao solo favorece o aumento de elementos como o cálcio e magnésio, e diminui o alumínio tóxico às plantas. Todos esses benefícios propiciam condições adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas, além de contribuir para o aumento da diversidade de organismos que habitam o solo (NEVES et al., 2009).

2.4 INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO

O termo qualidade do solo não apresenta uma definição absoluta, porém pode ser entendido como a capacidade do solo de desempenhar suas funções afim de garantir o crescimento e desenvolvimento das plantas (TORMENA et al., 1998; VAN LIER; GUBIANI, 2015; BRITO, 2019). É um conceito amplo, que se refere ao equilíbrio entre as condições físicas, químicas e biológicas do solo, de forma a sustentar a produtividade, manter e aumentar a qualidade do meio ambiente, promovendo a saúde de plantas, animais e do homem (DORAN, PARKIN, 1994).

“A qualidade do solo tem sido estudada, tendo a planta como mecanismo de resposta aos indicadores de qualidade, principalmente em áreas agrícolas, contudo, identificar os melhores parâmetros para detectar impactos, não é tarefa fácil, pois o ambiente dinâmico está em constante modificação, tanto pela ação do homem, quanto pela natureza (SUZUKI et al., 2014).”

Nesse sentido, os indicadores de qualidade devem ser utilizados a fim de que se busquem manter as condições físicas e químicas do solo adequadas, de forma que não comprometam a produtividade agrícola (CORTEZ et al., 2018), adotando sistemas de produção resilientes e sustentáveis. Contudo, devido a heterogeneidade e dinâmica do compartimento solo, a sua qualidade não pode ser mensurada de forma direta, podendo ser estimada a partir de indicadores de qualidade arbitrados pelo homem, correlacionando com as práticas intervencionistas e a sua composição natural (ARAÚJO et al., 2012).

Geralmente, se utilizam sistemas quantitativos com indicadores apropriados na avaliação de qualidade do solo, efetuando-se comparações com valores desejáveis em diferentes intervalos de tempo, para um fim específico, em agroecossistemas diversos (KARLEN; STOTT, 1994; CHAER, 2001; MELO FILHO et al., 2007). Para isso, faz-se necessário o uso de um conjunto mínimo de indicadores que apresentem características como facilidade de avaliação, aplicabilidade em diferentes escalas, utilização abrangente e sensibilidade a variações de manejo (DORAN; PARKIN, 1994; NIERO et al., 2010; CHAVES et al., 2012; SILVA et al., 2015).

Doran e Parkin (1994), foram pioneiros nos estudos de avaliação de qualidade do solo, e propuseram um conjunto básico de indicadores de qualidade de ordens física, química e biológica, a saber: textura, profundidade efetiva do solo e de raízes, densidade do solo, infiltração, retenção, armazenamento e disponibilidade de água no solo, teores de carbono e nitrogênio total no solo, pH, P, K, respiração e teores de nutrientes na biomassa microbiana. Segundo Vezzani e Mielniczuk (2009), indicadores foram propostos, de forma que se correlacionassem com cinco funções do solo: 1) Habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de água; 2) Habilidade de compartimentalizar o fluxo de elementos químicos; 3) Promover e sustentar o desenvolvimento das raízes; 4) Manter o habitat biológico adequado e, por fim, 5) responder ao manejo, resistindo à degradação.

No caso das propriedades físicas do solo, sua dinâmica é fortemente influenciada pela textura e mineralogia do solo, as quais podem afetar a resistência e resiliência do solo diante de uma determinada prática agrícola (SEYBOLD et al., 1999; SILVA et al., 2005). Nesse caso, as alterações nas propriedades físicas podem ser avaliadas através de indicadores relacionados à sua estabilidade, tais como estabilidade de agregados, densidade do solo, porosidade total e resistência mecânica à penetração (CAMPOS et al., 1995; SILVA et al., 2005).

Uma das propriedades físicas mais importantes a ser utilizada na avaliação de qualidade do solo é a porosidade total, em função de sua relação com a atividade microbiana e armazenamento de CO₂ proveniente da atmosfera (KRAVCHENKO et al., 2019). O valor de macroporosidade menor que 0,10 m³ m⁻³ é bastante restritivo para as plantas, pois compromete a difusão de gases e reduz o crescimento do sistema radicular da maioria das culturas (TAYLOR; ASHCROFT, 1972).

Outro atributo físico quem tem sido utilizado como indicador de qualidade do solo é a resistência à penetração (RP), pois está diretamente relacionada com o crescimento das plantas (DUARTE et al., 2019) e apresentar relação direta com a densidade do solo, grau de compactação, teor de água e classe de solo (SILVA et al., 2003; JUNIOR et al., 2006; LIMA et

al., 2008; BERGAMIM et al., 2010). Para a resistência à penetração, o limite crítico de 2 mPa vem sendo utilizado como indicador de qualidade física do solo, tanto em ambientes sob plantio direto, como em áreas manejadas sob preparo convencional do solo (MORAES et al., 2014).

A densidade do solo, calculada através da relação entre a massa do solo seco e o volume do solo é um bom indicador de qualidade do solo, pois além de predizer através de forma indireta o grau de compactação do solo, pode ser utilizada na estimativa da estrutura do solo correlacionando-a com o potencial de lixiviação, produtividade das culturas e aspectos erosivos do solo (DORAN; PARKIN, 1994; NEVES et al., 2007).

Quando se fala de atributos físico-hídricos do solo, a dinâmica de água é utilizada como um importante indicador de qualidade do solo, pois é um processo contínuo que controla o movimento dos elementos químicos do solo, formação e evolução dos solos, disponibilidade de nutrientes às plantas e satisfação da demanda hídrica pelas plantas (PINHEIRO et al., 2009). Auxilia na definição de políticas de proteção e conservação do solo e água, planejamento de sistemas de irrigação e drenagem, bem como na composição de uma imagem mais real de retenção, redistribuição e conservação de água no solo (GUERRA, 2000; CARVALHO, 2002; PINHEIRO et al., 2009).

No estudo da dinâmica de água no solo geralmente se utiliza a condutividade hidráulica como variável de avaliação, que pode ser determinada em campo ou em laboratório (TREVISAN et al., 2009). É um atributo dinâmico e apresenta correlação com vários outros atributos físicos do solo, como estrutura, textura, densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo (BRADY, 1983). Porém, além das propriedades físicas do solo, outros fatores também podem contribuir para a dinâmica de água no solo, nesse caso leva-se em consideração a viscosidade do líquido (DARCY, 1856).

Um solo arenoso pode apresentar baixa condutividade hidráulica saturada, se no caso o líquido que esteja permeando for mais viscoso que a água (DANIEL, 1994; PINHEIRO et al. (2017). A curva de retenção de água no solo (CRA) tem sido bastante utilizada para descrever a dinâmica de água no solo (DEXTER, 2004), pois representa graficamente a relação entre a energia de retenção de água (potencial matricial) com o seu respectivo conteúdo de água (CARDUCCI et al., 2011). É um atributo que depende das características intrínsecas de cada solo, e resulta da ação conjunta de atributos como textura, estrutura, mineralogia e conteúdo de matéria orgânica do solo (BEUTLER et al., 2002). Um fato importante na obtenção da curva de retenção de água no solo é o tamanho da amostra utilizada na aplicação das tensões, conforme verificado por Silva et al. (2018), avaliando a influência do tamanho da amostra na CRA. Para estes autores quanto menor o tamanho da amostra, menor será a diferenciação no

arranjo de poros, aproximando-o da real condição do solo, favorecendo uma melhor interpretação dos dados da CRA por meio da teoria da capilaridade do solo.

É um indicador de qualidade física do solo valioso, visto que através dele é possível estimar o teor de umidade na capacidade de campo (ANDRADE et al., 2013), ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível no solo às plantas (CARDUCCI et al., 2013; SERAFIM et al., 2013) e condutividade hidráulica não saturada (ANDRADE; STONE, 2009). Para Silva et al. (2017), a curva de retenção de água no solo também vem sendo utilizada para fins de avaliação da qualidade física do solo por meio de um único parâmetro, o índice S, como proposto por Dexter (2004).

Apesar de ser considerado um ótimo indicador de qualidade do solo (ANDRADE; STONE, 2009), deve ser utilizado com muita cautela, principalmente quanto aos limites de interpretação de seus valores (MAIA, 2011; VAN LIER, 2012). Em função de sua dependência ao conteúdo de água no solo, mineralogia e textura (SILVA et al., 2017), deve ser utilizado apenas para a avaliação entre sistemas de manejo incorporado ao mesmo solo e não, entre diferentes classes de solo (CARDUCCI et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2015). O valor do índice S pode variar conforme a metodologia aplicada para avaliar o conteúdo de água no solo (se a base de massa ou volume), geralmente obtendo-se valores mais elevados, quando a umidade utilizada no cálculo do ponto de inflexão da curva é calculada com base em volume ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (MAIA, 2011).

Em trabalhos sobre a avaliação do índice S em solo subsolado na região dos tabuleiros costeiros do estado do Espírito Santo, autores verificaram que o índice S aumentou com o aumento da macroporosidade e o volume total de poros e diminuiu com a densidade do solo e microporosidade, constituindo-se em uma boa ferramenta para verificação da qualidade física do solo sob diferentes sistemas de uso (SOUSA et al., 2015). É expresso pela porosidade estrutural do solo, resultante de microfendas, trincas, bioporos e poros macroestruturais, que são formados devido ao uso e manejo do solo para as culturas, e quanto maior esse índice, melhor será a distribuição e tamanho dos poros (ROSSETTI; CENTURION, 2018). Para Planossolos, verifica-se uma lacuna de informações na literatura acerca do índice S, principalmente para os sistemas de manejo do solo na região Nordeste do Brasil.

Quando Dexter (2004) propôs o índice “S” ele utilizou valores médios do ponto de inflexão $<0,020$ como indicador de solo degradado fisicamente, indicando predominância de poros texturais no solo. Contudo, esse valor não reflete as condições físicas para solos tropicais, onde se leva em consideração a distribuição bimodal de poros no solo, classificando-os como intra e inter-agregados, representando a porosidade estrutural do solo (ROSSETTI;

CENTURION, 2018). Os poros estruturais são grandes aliados no desenvolvimento das plantas, pois abrigam microrganismos responsáveis pela decomposição e ciclagem de materiais orgânicos no solo, melhorando a distribuição de raízes e a drenagem de água no solo, enquanto os poros texturais aumentam a retenção e disponibilidade de água (DEXTER et al., 2008).

A estabilidade de agregados do solo, processo que envolve um conjunto de elementos como argila, óxidos de ferro e alumínio, e matéria orgânica como agentes cimentantes no seu processo de formação (CORRÊA et al., 2009), é um importante indicador de qualidade física de solo, pois restabelece a porosidade do solo, influenciando no processo de infiltração de água e resistência à erosão (VICENTE et al., 2011). Depende da textura do solo e, assim juntamente com o grau de flocculação e argila dispersa em água, podem ser utilizados como parâmetros de avaliação de qualidade de solos sob diferentes sistemas de manejo (MELO et al., 2017).

A determinação de atributos como argila dispersa em água e grau de flocculação é importante, pois estes refletem diretamente na formação da compactação de solos, além de influenciar na agregação de partículas de solo (SANTOS et al., 2010). Nesse caso, a determinação da textura do solo torna-se imprescindível no estudo da compactação, formação de agregados, erodibilidade, além de possibilitar uma estimativa indireta de diversos outros fatores, dentre eles: dinâmica de água, resistência do solo a tração e penetração, capacidade de troca de cátions, dosagem de fertilizantes e corretivos (CENTENO et al., 2017).

Outro indicador que pode ser utilizado na avaliação da qualidade física do solo é o grau de compactação, pois apresenta uma estreita relação atributos físicos de solo de fácil determinação, mas que são grandes aliados nos estudos sobre influência de diferentes sistemas de manejo na qualidade do solo, como densidade do solo, porosidade total, capacidade de aeração e resistência mecânica à penetração (SUZUKI et al., 2007). Também conhecido como compactação relativa do solo, é um parâmetro útil e de fácil medição, contudo estudos sobre esse parâmetro são bastantes incipientes no Brasil (SANTOS et al., 2005; SUZUKI et al., 2007), principalmente para solos sob sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta para as condições edafoclimáticas da região Nordeste do Brasil. Portanto, a determinação e obtenção de valores críticos e de referência de compactação, torna-se indispensável para avaliação do desenvolvimento e produtividade das culturas.

A sua determinação leva em consideração os valores de densidade relativa do solo, que podem ser obtidos através dos ensaios de Proctor, ou através de funções de pedotransferência específicas (BROCH; KLEIN, 2017). A cerca de valores, o grau de compactação vai variar conforme o gradiente textural do solo e a resistência do sistema radicular da espécie a ser cultivada. Beutler et al. (2005) avaliando a densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos

para a produtividade de soja, verificaram que o valor médio de 0,80 ou grau de compactação = 80%, é o limite máximo restritivo que as plantas de soja suportam para crescer, sem ocasionar prejuízos relacionados a produtividade. Klein (2006) verificou que a faixa ideal para densidade relativa do solo (ρ_R) foi de 0,71 a 0,88, para um Latossolo Vermelho de textura argilosa, com predominância de microagregados.

Outros atributos podem ser utilizados como indicadores de qualidade do solo, neste caso, os químicos e biológicos, pois estão envolvidos na medição de processos de liberação de nutrientes, principalmente da matéria orgânica para o solo (DORODNIKOV et al., 2009; SANTOS et al., 2019). A avaliação dos indicadores químicos e biológicos de qualidade do solo é de grande utilidade para a definição das quantidades e tipos de fertilizantes requeridos pelas plantas e manutenção ou recuperação de produtividade, principalmente nos solos tropicais, onde a exposição a fatores climáticos como chuva e sol, o tornam pobres em nutrientes, com elevada acidez e déficit hídrico (RONQUIM, 2010).

Os indicadores químicos de qualidade do solo apresentam grande relevância nos estudos agronômicos e ambientais e normalmente se subdividem em quatro grupos: 1) Aqueles que indicam os processos do solo ou de comportamento, a exemplo de pH e Carbono Orgânico; 2) Aqueles que indicam a capacidade do solo em resistir às trocas de cátions, como: tipo de argila (1:1 ou 2:1), CTC, CTA, óxidos de ferro, óxidos de alumínio; 3) Aqueles que indicam a necessidade nutricional das plantas: macro e micronutrientes; 4) Os que indicam contaminação ou poluição: metais pesados, nitrato, fosfatos e agrotóxicos (GOMES; FILIZOLA, 2006).

A matéria orgânica do solo, comumente vem sendo utilizada como um indicador de qualidade do solo, por conta de sua suscetibilidade de alteração em relação as práticas de manejo do solo e por se correlacionar com a maioria das propriedades do solo (MIELNICZUK, 1999). A MOS é um componente importante para o solo e se refere a todo o material orgânico presente no solo incluindo a liteira, a fração leve, a biomassa microbiana, substâncias orgânicas solúveis em água e a matéria orgânica estabilizada, mais conhecida como húmus (STEVENSON, 1994).

Portanto, determinar o conteúdo de matéria orgânica do solo e seus constituintes torna-se uma ferramenta indispensável para avaliação de qualidade do solo, principalmente para os tropicais, já que são altamente intemperizados e a matéria orgânica favorece a retenção e disponibilidade de água, além de atuar na liberação de nutrientes para as plantas (OLDFIELD, 2018). Para Nanzer et al. (2019), dentre os indicadores de qualidade do solo relacionados à matéria orgânica do solo, o estoque de carbono é um dos mais confiáveis, pois a depender do

sistema de manejo adotado, seus teores podem permanecer estáveis, aumentar ou diminuir, em relação às áreas onde não há interferência de ordem antrópica.

Ele está relacionado a quantidade de matéria orgânica do solo, as taxas de decomposição dessa matéria e a atividade radicular das plantas (SANTOS et al., 2014). Nas áreas florestais, o estoque de carbono tende a ser maior em superfície em função da maior deposição de material orgânico, principalmente folhas e galhos (LARDY et al., 2002), já nas áreas florestais com predominância de espécies savânicas, ocorre uma alocação de biomassa para as raízes, elevando o estoque de carbono nas camadas mais profundas do solo (HOFFMANN; FRANCO, 2003).

As alterações nos teores de Carbono Orgânico Total (COT) são dificilmente detectáveis em curto prazo, em parte devido a elevada variabilidade natural dos solos, contudo, sua determinação em sistemas de produção ao longo do tempo é imprescindível, pois pode permitir a mensuração do grau de preservação dos ecossistemas naturais e os possíveis impactos causados em sistemas agrícolas com diferentes tipos de manejo do solo (SILVA et al., 2011). O estudo das modificações de carbono do solo provocadas pela mudança de uso da terra possibilita adotar medidas de manejo que reduzam os riscos sobre futuros impactos negativos ao solo (SANTOS et al., 2019).

Geralmente, quando os solos de florestas são convertidos para áreas de pastagem ou de agricultura, percebe-se uma drástica redução no teor de carbono orgânico do solo (GOL, 2009), principalmente nos vinte centímetros superficiais do perfil de solo (SILVA et al., 2019), consequência do manejo inadequado do solo, através do revolvimento ou mesmo falta de manutenção da cobertura do solo. Existe uma forte interação entre o carbono orgânico e os atributos físicos de solo com as atividades de manejo, presumindo-se então, que a avaliação dessa variável (COT) é importante no processo de escolha das práticas de manejo do solo mais adequadas, podendo tornar a agropecuária uma atividade social e ambientalmente mais correta, e atuar na mitigação de emissões de gases do efeito estufa para a atmosfera, de forma a reduzir a pressão por abertura de novas fronteiras de produção (SALES et al., 2018).

2.5 PLANOSSOLOS: CARACTERIZAÇÃO, USO E MANEJO

Os Planossolos são solos minerais que apresentam desargilização (perda de argila) vigorosa da parte superficial para a subsuperficial, conferindo características distintivas marcantes (EMBRAPA, 2019). Ocupam uma área de 226.661,75 km², aproximadamente 2,66% do território brasileiro, estando entre as 13 ordens de solos mais representativas (SANTOS et

al., 2006) e ocorrem em grande parte da região Nordeste, Pantanal, Rio de Janeiro e região Sul do país. Corresponde por 10,5% da região semiárida, ocupando uma área de 78.500 km² (MELO FILHO; SOUZA, 2006). No estado da Paraíba o Planossolo Háplico ocupa uma área de 5.929,18 km², o que representa 10,36% do território (MEDEIROS, 2018).

Uma característica marcante dos Planossolos é a mudança textural abrupta, com acentuada diferença de textura do horizonte A para o B, sendo a desargilização o processo responsável para caracterização arenosa nos horizontes A e E (EMBRAPA 2019). Apresenta horizonte B-plânico, subjacente a qualquer horizonte A, podendo ou não apresentar horizonte E alóico. Podem apresentar horizonte cálcico, com caráter carbonático, duripã, propriedade sódica, solódica, salino ou sálico (EMBRAPA, 2019). Normalmente são adensados devido ao acúmulo de argila em subsuperfície, por vezes, um horizonte pã (endurecido quando seco).

Geralmente ocorrem em áreas com relevo plano ou suave-ondulado, onde as condições ambientais e o próprio solo favorecem vigência periódica e anual de excesso de água, mesmo que de curta duração (Figura 2), mesmo em regiões sujeitas a estiagem prolongada, até mesmo sob as condições de semiárido (EMBRAPA, 2019).

Figura 2. Perfil de Planossolo Háplico da área experimental da EMPAER em Alagoinha, PB.



Fonte: O autor (2019).

Nas localidades com clima úmido, onde predominam as depressões e várzeas, os Planossolos geralmente apresentam hidromorfismo; já nas áreas semiáridas, mesmo em pontos onde o solo está sujeito a excesso de água por um curto período de tempo, principalmente sob

as condições de relevo suave-ondulado, não apresentam características de hidromorfismo (EMBRAPA, 2019). Apresentam estrutura prismática, de textura média, com presença de microagregados pouco estáveis, com predominância de cores amarronzadas e presença de mosqueados (SANTOS et al., 2013) e forte presença de mica e vermiculita, argilominerais do tipo 2:1 (MOTA et al., 2002).

Apresenta horizonte superficial de cor escura, indicando presença de matéria orgânica e horizonte subsuperficial de coloração avermelhada, indicativo da presença de óxidos de ferro (SCHWERTMANN, 1996; STERCK et al., 2002). Quanto ao uso, geralmente os Planossolos hidromórficos são utilizados para a produção de arroz e pastagens, principalmente na região Sul do país.

É um solo que apresenta permeabilidade lenta ou muito lenta, normalmente adensados devido ao acúmulo de argila em subsuperfície; presença de horizonte endurecido ou cimentado, responsável pela formação de lençol de água sobreposto, de presença periódica ou variável ao longo do ano (EMBRAPA, 2019). Apresenta restrição à percolação de água, independente da porção do lençol freático, ocasionando retenção temporária de água. Constituem limitações ao uso em função de sua camada superficial arenosa, baixa retenção de água, deficiência nutricional e teores elevados de sódio que podem limitar o desenvolvimento da maioria das culturas (EMBRAPA, 2019).

As principais limitações relacionadas ao solo estavam relacionadas em dificuldades à mecanização, diferença textural abrupta entre os horizontes A e B, pequena profundidade. textura arenosa em superfície e argila de alta atividade em subsuperfície (SOUZA et al., 2013). Segundo os mesmos autores, essa classificação o torna um ambiente de pouca sustentabilidade para as plantas e raízes, devido a facilidade de compactação, principalmente no período chuvoso, quando há excesso de água, e problemas com excesso de sódio em subsuperfície.

Quanto ao manejo, os cuidados com os problemas de drenagem devem ser observados, principalmente nos solos hidromórficos; a correção do solo deve ser realizada em função dos teores nocivos de alumínio à maioria das culturas (EMBRAPA, 2019). No Nordeste brasileiro os Planossolos são bastante utilizados com pastagens, palma forrageira, feijão, milho e sorgo, contudo demonstrando pouca habilidade técnica quanto às práticas de manejo (SOUZA et al., 2013). Indicadores de qualidade física e química para Planossolos sob diferentes sistemas de manejo para as condições edáficas do Nordeste são pouco conhecidos na literatura, contudo, Lima et al. (2008) avaliando atributos físicos de um Planossolo Háptico sob diferentes sistemas de manejo no estado do Rio Grande do Sul, sugeriram que os valores críticos de $\rho = 1,56 \text{ mg m}^{-3}$, $K_0 = 16,18 \text{ mm h}^{-1}$ e diâmetro médio ponderado de agregados = 2,49 mm, devem ser

utilizados como valores limitantes para os vegetais cultivados em solos pertencentes a esta classe.

2.6 OBJETIVOS

2.6.1 Geral

Avaliar atributos físicos e químicos de um Planossolo Háplico sob sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) no Agreste da Paraíba

2.6.2 Específicos

- Caracterizar atributos físicos de solo relacionados a estrutura, como densidade do solo, estabilidade de agregados e espaços porosos do solo;
- Estudar a dinâmica de água no solo, especialmente se tratando de movimentação, retenção e disponibilidade de água;
- Caracterizar os atributos químicos e de fertilidade do solo, com destaque para o estoque, recuperação e estratificação de carbono.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento está sendo conduzido desde julho de 2015 em área experimental da Empresa Paraibana de Pesquisa, Extensão Rural e Regularização Fundiária (EMPAER), em Alagoinha (PB). O município está inserido na microrregião de Guarabira e mesorregião geográfica do Agreste da Paraíba sob as coordenadas (06°57'00" S e 35°32'42" W) e 317 metros de altitude.

Segundo a classificação Köppen-Geiger, o clima que predomina no município é do tipo As' – quente e úmido, com chuvas de outono-inverno e período chuvoso entre os meses de março e agosto (ALVES et al., 2013). A precipitação média anual é de 995 mm, com temperatura variando de 22 a 26 °C e umidade relativa do ar anual em torno de 25%. Segundo a classificação agroclimática de Thornthwaite e Matter (1955) para a capacidade de

armazenamento de água no solo de 100 mm, o período com maior disponibilidade de água no solo para Alagoinha situa-se entre abril e julho (ROLIM; SENTELHAS, 1999).

O solo da área experimental foi classificado como Planossolo Háplico com horizonte A moderado e de textura franco arenosa (SANTOS et al., 2018). A caracterização física e química do solo da área experimental antes da instalação do experimento encontra-se nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Caracterização física do Planossolo Háplico antecedente a implantação do experimento, camada de (0,00-0,20 m).

Areia	Silte	Argila	ADA	GF	Ds	Dp	PT	Classe Textural
----- g kg ⁻¹ -----				%	--- g cm ⁻³ ---		m ³ m ⁻³	
685	172	143	38	73,4	1,54	2,64	0,42	Franco Arenosa

ADA = Argila dispersa em água; GF = Grau de floculação; Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partículas; PT = Porosidade total.

Tabela 2. Caracterização de química e fertilidade do Planossolo Háplico antecedente a implantação do experimento, camada de (0,00-0,20 m).

pH (H ₂ O)	P	K ⁺	Na ⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Al ³⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SB	CTC	COT
(1:2,5)	- mg dm ⁻³ -		----- cmol _c dm ⁻³ -----							g kg ⁻¹
5,7	6,98	194,00	0,03	4,46	0,00	2,71	1,17	4,47	8,87	9,10

SB = Soma de bases, CTC = Capacidade de troca de cátions, COT = carbono orgânico total.

3.2 Histórico da área experimental

Antes da instalação do sistema do iLPF, a área experimental encontrava-se cultivada com *Brachiaria decumbens* em sistema de produção sob pastejo convencional, de forma atender a demanda dos animais da raça Sindi e Gir por alimento. Em julho de 2015 através de iniciativa público-privada foi implantada uma Unidade de Referência Tecnológica (URT) com sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) em uma área com 1,596 hectares como forma de avaliar alternativas sustentáveis de produção para a condição edafoclimática da mesorregião Agreste da Paraíba.

Em setembro de 2015 realizou-se o preparo do solo e, em seguida, o transplântio das primeiras mudas de essências florestais com espaçamento de 3 x 2 m e em fileiras triplas, totalizando seis fileiras por parcela. Realizou-se a adubação de transplântio com base na análise de solo e nas recomendações técnicas presentes no manual de adubação do solo para o estado

de Pernambuco (IPA, 2008). Na Tabela 3, encontram-se descritas as espécies transplantadas na área experimental e informações acerca da necessidade de calagem e adubação do solo.

Tabela 3. Espécies arbóreas implantadas na área experimental (iLPF), correção do solo e adubação.

Espécie arbórea	CaCO ₃	KCl	MAP
	----- g cova ⁻¹ -----		
<i>Gliricidia sepium</i>	15	30	48
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	35	40	96
<i>Mimosa caesalpinhiifolia</i>	25	30	48

CaCO₃ – Calcário dolomítico (PRNT = 95%), KCl – Cloreto de potássio (60% K₂O), MAP – Monoamônio fosfato (50% P₂O₅).

Na área experimental, o componente lavoura-anual (LA) está sendo mantido em sistema de rotação de culturas ao longo dos anos, destacando-se o cultivo de leguminosas e ou gramíneas de ciclo curto em consórcio (Tabela 4).

Tabela 4. Descrição do componente lavoura-anual implantado na área experimental.

Safra	Componente lavoura anual
2015/2016	Milho/ <i>Brachiaria decumbens</i>
2016/2017	Soja/ sorgo
2017/2018	Algodão/ feijão caupi
2018/2019	Gergelim/ soja/ sorgo/ amendoim

Feijão caupi (*Vigna unguiculata*), soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*), sorgo (*Sorghum bicolor*), amendoim (*Arachis hypogaeae*), gergelim (*Sesamum indicum*), algodão (*Gossypium hirsutum*).

No ano de avaliação do experimento em 2019, o sistema lavoura anual, encontrava-se cultivado através do consórcio Milho/ *Brachiaria*. Foi implantado o componente animal na área com sistema de integração entre os meses de janeiro e fevereiro de 2019, logo após o estabelecimento das espécies florestais. Foram utilizados 30 animais (bovinos) da raça Sindi e pastejaram na área por um período de 35 dias. Nas figuras (3 - A e B), observa-se um panorama da área experimental com destaque para o componente arbóreo e para as parcelas com lavoura.

Figura 3. Sistema iLPF, destacando-se as parcelas experimentais com lavoura anual. (A) Parcela experimental com soja e (B) parcela experimental com amendoim e componente arbóreo na parte superior.



(A)



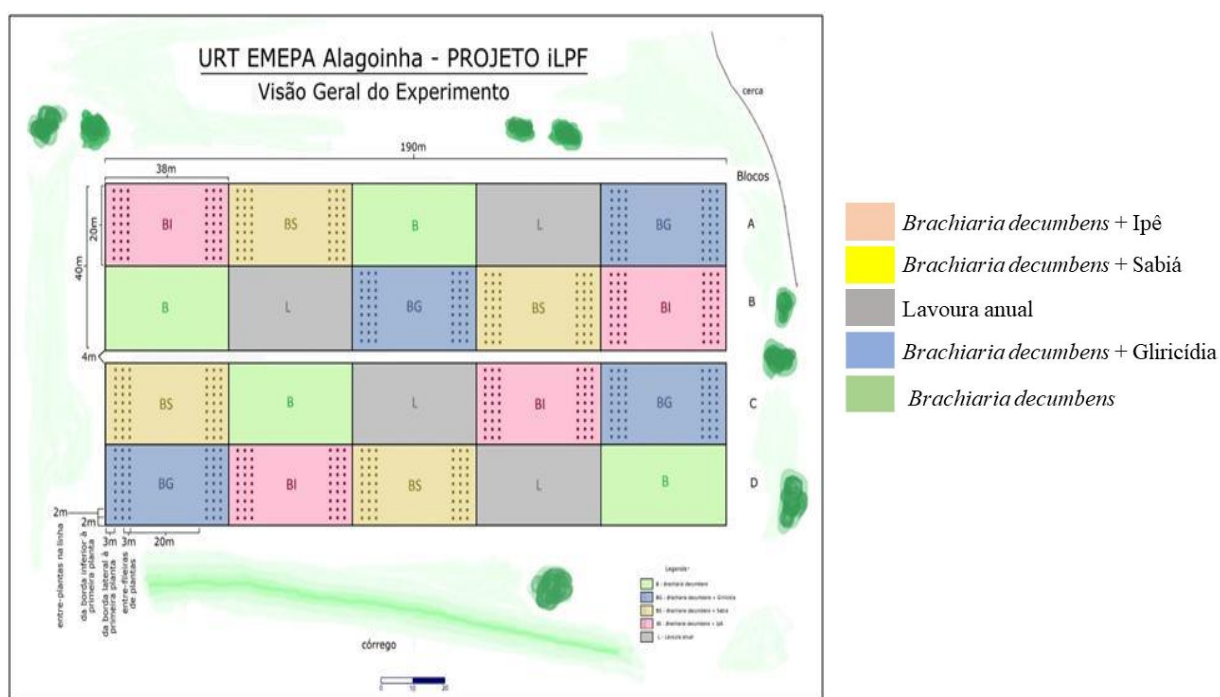
(B)

3.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC) com cinco tratamentos e quatro repetições (5 x 4). Os tratamentos foram compostos pelos seguintes consórcios: T1) *Brachiaria decumbens* Stapf. + Gliricídia (*Gliricidia sepium*); T2) *Brachiaria*

decumbens Stapf. + Sabiá (*Mimosa caesalpinhiifolia* Benth.); T3) *Brachiaria decumbens* Stapf. + Ipê (*Tabebuia alba* (Chamisso) Sandwith); T4) Lavoura Anual e T5) *Brachiaria decumbens* Stapf., conforme mostrado na Figura 4. As parcelas experimentais apresentavam área total de (38 x 20 m) e distanciavam 4 metros entre blocos, totalizando 760 m².

Figura 4. Disposição das parcelas experimentais com os tratamentos no iLPF, em Alagoinha, PB.



3.4 Coleta e preparo das amostras

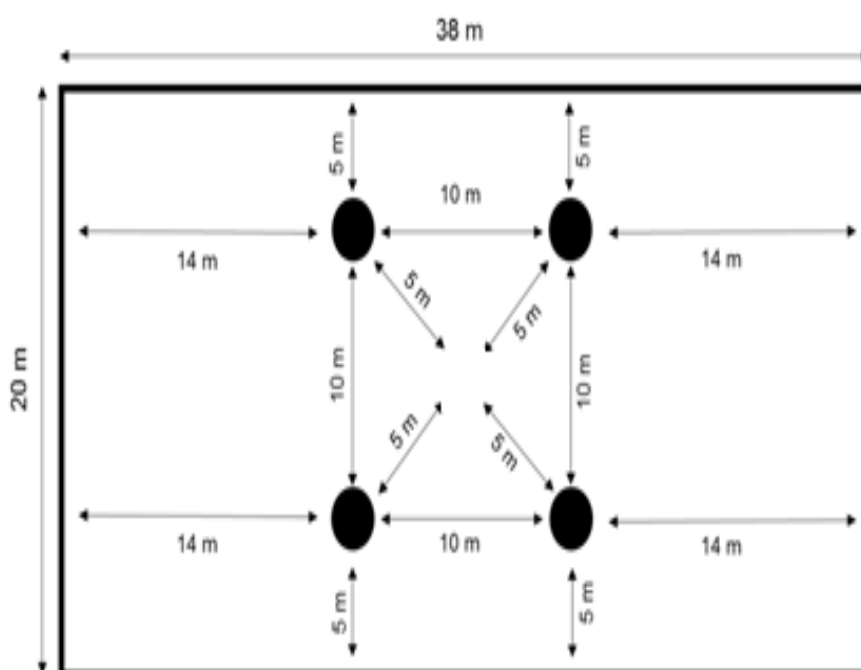
As amostras de solo utilizadas para a determinação das variáveis foram coletadas de duas formas, com estrutura indeformada para as análises físicas, e deformada para as análises de química e fertilidade. As amostras indeformadas foram coletadas em quatro pontos amostrais da parcela experimental na forma de grille categorizado (Figura 2), distanciados de dez metros entre cada ponto de coleta. Utilizou-se anéis volumétricos do tipo Uhland com volume de 102,09 cm³.

Logo após as coletas, as amostras indeformadas foram encaminhadas ao Laboratório de Análises Físicas de Solo, do Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSER), da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) para a realização de análises. As amostras utilizadas para as análises de química e fertilidade do solo com estrutura deformada foram coletadas com

auxílio de pá de corte, de forma a obter material em três profundidades (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m). Posteriormente foram destorroadas, secas ao ar (TFSA), tamisadas em peneiras com malha de 2,00 mm e encaminhadas ao Laboratório de Química e Fertilidade do solo do DSER, da UFPB para a realização de análises.

Totalizou-se 480 amostras de solo coletadas, sendo 240 para as análises físicas de solo e 240 para análises de química e fertilidade, sendo quatro pontos (ambos sob o renque das espécies florestais), três profundidades, vinte parcelas experimentais e dois tipos estruturais de amostras – deformadas e indeformadas (4 x 3 x 20 x 2).

Figura 5. Representação esquemática dos pontos de coleta na parcela experimental.



3.5 Variáveis analisadas

3.5.1 Variáveis físicas

Foram realizadas as seguintes determinações físicas: granulometria (Areia, silte, argila), argila dispersa em água (ADA), grau de floculação (GF), percentual de macro agregados úmidos e secos (MacroU, MacroS), percentual de micro agregados úmidos e secos (MicroU, MicroS), diâmetro médio ponderado de agregados úmidos (DMPAu), diâmetro médio ponderado de agregados secos (DMPAs), índice de estabilidade de agregados (IEA), índice de estabilidade estrutural do solo (IEE), índice slope (S), densidade do solo (ρ), densidade máxima

do solo (ρ_{max}), densidade do solo relativa (ρ_R), grau de compactação estimado (GCE), condutividade hidráulica saturada (K_θ), porosidade total calculada (α) e estimada (α_{Est}), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), capacidade de aeração do solo (CAS), capacidade de aeração relativa (θ_{CAR}), capacidade de campo (θ_{cc}), ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), água disponível as plantas (θ_{AD}), capacidade de água disponível (CAD), capacidade de campo relativa (CCr) e curva de retenção de água no solo (CRA).

3.5.2 Variáveis de química e fertilidade do solo

Foram determinadas as seguintes variáveis de química e fertilidade do solo: carbono orgânico total (COT), estoque de carbono (ESTC), índice de compartimentação de carbono (ICC), estratificação de carbono (ΔEC), taxa de recuperação de carbono (TREC), pH em água, fósforo (P), potássio (K^+), sódio (Na^+), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg), Ca + Mg, alumínio (Al^{+3}), hidrogênio + alumínio ($\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$), matéria orgânica do solo (MOS), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e índice de saturação por bases (V%).

3.6 Procedimentos metodológicos

3.6.1 Variáveis físicas

A granilometria do solo foi determinada através do método do densímetro de Bouyoucos (GEE; BAUDER, 1986), utilizando o Hidróxido de Sódio ($\text{NaOH} - 1 \text{ mol L}^{-1}$) como dispersante químico mais agitação mecânica como dispersante físico. Para a argila dispersa em água (ADA), utilizou-se o mesmo procedimento da determinação da análise de textura, porém, sem o uso do dispersante químico (TEIXEIRA et al., 2017). A partir dos dados da argila total e dispersa, foi possível calcular o grau de floculação do solo, equação 1:

$$\text{GF (g kg}^{-1}\text{)} = [(\text{ArgT} - \text{ArgH}_2\text{O}) / (\text{ArgT})] \times 1000 \quad (1)$$

Em que: GF é o grau de floculação (g kg^{-1}); ArgT é a fração de argila dispersa em hidróxido de sódio - NaOH (g kg^{-1}) e ArgH₂O é a fração da argila dispersa em água (g kg^{-1}).

A determinação do diâmetro médio ponderado de agregados úmidos (DMPAu), diâmetro médio ponderado de agregados secos (DMPAs) e o percentual de macroagregados úmidos (MacroU) e secos (MacroS) seguiu a metodologia proposta por Kemper e Chepil, (1965), com alterações propostas por Carpenedo e Mielniczuk (1990) e por Silva e Mielniczuk

(1997), que tem como princípio, avaliar a resistência que os agregados apresentam quando submetidos à oscilações em peneiras em água e em tamisamento a seco. O índice de estabilidade de agregados (IEA) foi estimado mediante relação entre o DMPAu/DMPAs, equações, 2, 3 e 4:

$$\text{DMPAu (mm)} = \sum (X_{is} \times W_{is}) \quad (2)$$

$$\text{DMPAs (mm)} = \sum (X_{iu} \times W_{iu}) \quad (3)$$

$$\text{IEA} = \text{DMPAu} / \text{DMPAs} \quad (4)$$

Em que: DMPAu (mm) – é o diâmetro médio ponderado de agregados via úmida, DMPAs (mm) - diâmetro médio ponderado de agregados via seca, X_{is} (mm) – diâmetro médio de cada classe de agregado por via seca, W_{is} (%) – proporção de agregados em cada classe de peneira (i) por via seca, X_{iu} (mm) – diâmetro médio de cada classe de agregado por via úmida, W_{iu} (%) – proporção de agregados em cada classe de peneira (i) por via úmida e IEA é o índice de estabilidade de agregados (adimensional).

O índice de estabilidade estrutural do solo (IEE) foi determinado conforme metodologia proposta por Pieri (1992), usando-se o conteúdo de carbono orgânico total do solo (COT – g kg⁻¹), e os teores de argila e silte do solo (g kg⁻¹). O cálculo para a obtenção dos valores médios do IEE de cada tratamento foi realizado utilizando a equação 5:

$$\text{IEE (\%)} = [\text{COT} \times 1.7240 / (\text{silte} + \text{argila})] \times 100 \quad (5)$$

Em que: IEE = índice de estabilidade estrutural (%); COT = é o conteúdo de carbono orgânico do solo (g kg⁻¹) e 1,7240 = fator de conversão para matéria orgânica do solo. O IEE apresenta algumas faixas de limites que são utilizadas para avaliar a qualidade estrutural do solo, sendo: > 9% - estrutura estável; 7% < IEE ≤ 9% - indica baixo risco de degradação estrutural; 5% < IEE ≤ 7% - alto índice de degradação; IEE ≤ 5% - solo estruturalmente degradado (PIERI, 1992).

O índice “S” (do inglês *Slope = inclinação*), foi determinado através do ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo (CRA), conforme proposto por Dexter (2004), usando-se a restrição de Maulem (1986). A equação utilizada para o cálculo do índice |S|, encontra-se abaixo:

$$|S| = -n \cdot (\theta_s - \theta_R) \cdot [1 + 1/m]^{-(1+m)} \quad (6)$$

Em que: $|S|$ = é o valor de inclinação da curva de retenção de água no solo no seu ponto de inflexão. Como proposto por Dexter (2004) os valores são apresentados em módulo de forma a facilitar a discussão e compreensão dos resultados (adimensional); n = é um parâmetro empírico de ajuste da curva de retenção (adimensional); θ_s = é o teor de umidade no solo saturado ($\Psi_m = 0$, $m^3 m^{-3}$); θ_R = é o conteúdo de umidade residual do solo ($m^3 m^{-3}$); e $m = (1 - 1/n)$ – é a unidade de restrição de Mualem (1986). Dexter (2004) sugeriu um valor limite para o índice S que separa os solos com boa estabilidade estrutural de solos com condições físicas inapropriadas (degradados): $S \geq 0,035$ – boa qualidade estrutural; $S < 0,020$ – solo pobre e degradado.

A densidade do solo (ρ) foi determinada conforme metodologia proposta por Blake e Hartge (1986), através da relação entre a massa do solo seco e o volume da amostra, conforme equação 7:

$$\rho \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = m_{ss} / v \quad (7)$$

Em que ρ = densidade do solo ($g\text{ cm}^{-3}$); m_{ss} = massa do solo seco mantido em estufa a $\pm 105\text{ }^\circ\text{C}$ por um intervalo mínimo de 48 horas, ou até atingir o peso constante; e v = é o volume da amostra de solo no cilindro (cm^3) calculada através da expressão ($\pi \cdot r^2 \cdot h$).

A densidade de partículas do solo (ρ_s) foi calculada através do método do balão volumétrico conforme metodologia descrita no manual de métodos de análise de solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (TEIXEIRA et al., 2017). A densidade máxima do solo (ρ_{max}) e a densidade relativa do solo (ρ_R) foram determinadas de acordo com Marcolin e Klein (2011), utilizando uma função de pedotransferência (FTP). No cálculo da (ρ_{max}) levou-se em consideração os teores de argila e o conteúdo de matéria orgânica do solo observado em cada tratamento. A densidade relativa do solo (ρ_R) foi estimada através da relação entre a (ρ_{max}) e a densidade do solo (ρ), equações 8 e 9:

$$\rho_{max} \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = 2.03133855 - 0.00320878 \text{ MOS} - 0.00076508 \text{ Argila} \quad (8)$$

$$\rho_R = \rho / \rho_{max} \quad (9)$$

Em que: ρ_{max} = densidade máxima do solo ($g\text{ cm}^{-3}$); MOS = o conteúdo de matéria orgânica do solo ($g\text{ kg}^{-1}$); Argila = teor de argila da amostra de solo ($g\text{ kg}^{-1}$) e ρ_R = densidade

relativa do solo (adimensional). A densidade máxima do solo varia de acordo com o teor de MOS e Argila do solo. Já a densidade relativa apresenta uma faixa de valores, que varia de: 0 a ≤ 1 (adimensional). Já para a densidade relativa do solo, problemas de restrição do desenvolvimento do sistema radicular dos vegetais podem ser observados quando o seu valor se aproxima de $\rho_R = 0,75$.

Com os dados de densidade do solo (ρ) e densidade máxima do solo (ρ_{max}), foi possível estimar o grau de compactação do solo (GCe), definindo o percentual de compactação do solo em relação ao seu máximo, conforme metodologia apresentada por Suzuki et al. (2007). A equação utilizada para calcular o GCe, encontra-se a baixo, 10:

$$GCe (\%) = (\rho / \rho_{max}) * 100 \quad (10)$$

Onde: GCe = grau de compactação (%); ρ = densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) e ρ_{max} = densidade máxima do solo ($g\ cm^{-3}$). Levando-se em consideração o valor de $\rho_R = 0,75$, como sendo restritiva para solos arenosos (MARCOLIN; KLEIN, 2011), pode se atribuir o valo de 75%, como sendo o limite superior restritivo para o grau de compactação do solo.

A condutividade hidráulica saturada do solo (K_θ) foi determinada conforme metodologia proposta por Teixeira et al. (2017). Utilizou-se amostras com estrutura indeformada $102,09\ cm^3$, previamente saturada em água destilada por um intervalo de 48 horas. Após o período de saturação, as amostras foram introduzidas no permeâmetro de carga constante até atingir o equilíbrio na taxa de percolação do líquido coletado (água). Utilizou-se a equação (11), de forma a se obter os valores de condutividade hidráulica saturada do solo (K_θ) em $cm\ h^{-1}$.

$$(K_\theta) = Q \times L / A \times H \times T \quad (11)$$

Onde: (K_θ) = é a condutividade hidráulica saturada ($cm\ h^{-1}$); Q = é o volume de água percolado e coletado em proveta (mL^{-1}); L = altura do bloco de solo em (cm); A = área do cilindro em (cm^2); H = altura do bloco de solo + lâmina de água (cm) e T = o tempo em horas de coleta do volume de água percolado. A condutividade hidráulica saturada do solo pode variar conforme variações na estrutura e textura do solo.

E a faixa de valores que podem ser utilizadas na avaliação da qualidade do solo por meio da condutividade hidráulica saturada serão apresentadas a seguir, conforme adaptação de dados apresentadas por Soil Survey Staff (1993): $> 25,4\ cm\ h^{-1}$ = muito rápida; $25,4 \geq K_\theta < 12,7$ =

moderada a rápida; $12,7 \geq K_{\theta} < 6,35$ = moderada; $6,35 \geq K_{\theta} < 2,0$ = lenta a moderada; $2,0 \geq K_{\theta} < 0,5$ = lenta; $K_{\theta} < 0,5$ = muito lenta.

A porosidade total (α) do solo foi determinada de duas maneiras, 1) através da umidade do solo correspondente ao volume de saturação, denominando-se porosidade total estimada (α_{Est}) e 2) através da relação entre a densidade do solo e densidade de partículas, sendo denominada de porosidade total calculada (TEIXEIRA et al., 2017). As amostras de solo com estrutura indeformada/ preservada foram saturadas em água destilada por um intervalo de 48 horas de forma a saturar todos os espaços porosos com diâmetro maior que 0,05 mm, para posterior obtenção do volume de saturação do solo ($\Psi_m = 0$) e obtenção da α_{Est} ($m^3 m^{-3}$).

A equação (12) foi utilizada para o cálculo da porosidade total estimada (α_{Est}) e a equação (13) para a obtenção da porosidade total do solo (α) calculada:

$$\alpha_{Est} (m^3 m^{-3}) = M_{ssat} - M_{sseco} / \text{volume} \quad (12)$$

$$\alpha (m^3 m^{-3}) = [1 - (\rho / \rho_s)] \quad (13)$$

Onde: α_{Est} = porosidade total do solo estimada pelo volume de saturação ($m^3 m^{-3}$); M_{ssat} = massa do solo saturada ($\Psi_m = 0$) em (kg^{-1}); M_{sseco} = massa do solo seco em estufa a $\pm 105^\circ C$ (kg^{-1}); volume = volume da amostra de solo no anel volumétrico calculado pela expressão: $(\pi * r^2 * h) - cm^3$; α = porosidade total do solo calculada ($m^3 m^{-3}$); ρ = densidade do solo ($g cm^{-3}$) e ρ_s = densidade de partículas ($g cm^{-3}$).

A microporosidade do solo (M_i) foi determinada através do potencial matricial $\Psi_m = 6$ kPa em mesa de tensão, por um período mínimo de 72 horas, ou após cessar a drenagem de água dos poros maiores que 0,05 mm (Equação 14). A macroporosidade do solo (M_a) foi obtida através da relação entre a porosidade total do solo calculada e a microporosidade do solo (M_i) em mesa de tensão, equação:

$$M_i (m^3 m^{-3}) = M_{ssolo \Psi_m 6 \text{ kPa}} - M_{sseco} / \text{volume} \quad (14)$$

$$M_a (m^3 m^{-3}) = M_i - \alpha \quad (15)$$

Em que: M_i = microporosidade do solo ($m^3 m^{-3}$); $M_{ssolo \Psi_m 6 \text{ kPa}}$ = umidade do solo em mesa de tensão no potencial matricial de 6 kPa; M_{sseco} – massa do solo seco (kg^{-1}); volume

= volume da amostra de solo no anel volumétrico calculado pela expressão: $(\pi * r^2 * h) - \text{cm}^3$ e α = porosidade total do solo calculada ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

A capacidade de aeração do solo (CAS) é um importante indicador de qualidade do solo e sua obtenção é realizada através de metodologia proposta por Reynolds et al. (2007). Para o cálculo da CAS usa-se amostras de solo saturado e o conteúdo de água correspondente a capacidade de campo do solo ($\theta_{\text{CC}} - \text{m}^3 \text{m}^{-3}$). A equação utilizada para o calculo da capacidade de aeração do solo (CAS) encontra-se abaixo, 16:

$$\text{CAS} (\text{m}^3 \text{m}^{-3}) = \theta_s - \theta_{\text{CC}} \quad (16)$$

Onde: CAS = capacidade de aeração do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s = umidade do solo saturado no potencial matricial $\Psi_m = 0$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_{CC} = capacidade de campo determinada em câmara de Richards com placa porosa na tensão de -10 kPa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Por ser um importante parâmetro de avaliação de qualidade do solo, geralmente a CAS adequada para que haja um equilíbrio entre o volume de água e a difusão de gases no solo deve ser $\geq 0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ou 10%. Cockroft e Olsson (1997) sugeriram o limite mínimo de $\text{CAS} \geq 0,15 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ como o valor mínimo aceitável para solos de textura fina, de forma que não haja problemas para a difusão de gases e atividade microbiana no solo. Drewry e Paton (2005), recomendaram o limite de CAS $0,12 - 0,17 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, para solos siltosos.

Para solos de textura arenosa, como os de classificação textural franco-arenosa o valor $\text{CAS} > 0,14 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ é o mínimo requerido para que haja uma adequada difusão de gases na zona radicular, minimizando assim, os problemas relacionadas a atividade dos microrganismos e o desenvolvimento dos vegetais (CARTER, 1988).

A capacidade de aeração relativa (θ_{CAR}) é uma variável física utilizada para avaliar o teor de umidade do solo para o nível de adequação mínimo de aeração do solo. Ou seja, é o limite mínimo de umidade do solo para uma capacidade de aeração de $\text{CAS} = 0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Para a sua obtenção utilizou-se a metodologia proposta por Anghinoni et al. (2017) e calculada através da equação 17:

$$\theta_{\text{CAR}} (\text{m}^3 \text{m}^{-3}) = [1 - (\rho / \rho_s)] - 0,1 \quad (17)$$

Onde: θ_{CAR} = capacidade relativa de aeração do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ρ = densidade do solo (g cm^{-3}); ρ_s = densidade de partículas (g cm^{-3}) e 0,1 é o nível mínimo restritivo para a capacidade de aeração do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

A capacidade de campo (θ_{CC}), o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e o volume de água disponível (θ_{AD}), foram obtidos conforme metodologias propostas por Richards (1947) e Reichardt (1981), aplicando-se potenciais matriciais sobre as amostras de solo indeformadas em câmara de Richards com placa porosa. Por ser um solo arenoso, utilizou-se o potencial matricial de $\Psi_m = -10$ kPa para a capacidade de campo (θ_{CC}) e $\Psi_m = -1.500$ kPa para o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}). A umidade correspondente a água disponível (θ_{AD}) foi obtida através da relação entre a (θ_{CC}) e o (θ_{PMP}) (RICHARDS; WEAVER, 1944). O cálculo das variáveis (θ_{CC}) e (θ_{PMP}), foi realizado através das equações 18 e 19:

$$\theta_{CC} (m^3 m^{-3}) = \theta (\Psi -10 \text{ kPa}) - Msseco / \text{volume} \quad (18)$$

$$\theta_{pmp} (m^3 m^{-3}) = \theta (\Psi -1.500 \text{ kPa}) - Msseco / \text{volume} \quad (19)$$

$$\theta_{AD} (m^3 m^{-3}) = \theta_{CC} - \theta_{pmp} \quad (20)$$

Onde: θ_{CC} = capacidade de campo, correspondente ao volume de água no potencial matricial ($\Psi_m -10$ kPa) ($m^3 m^{-3}$); θ_{PMP} = ponto de murcha permanente, correspondente ao volume de água no potencial matricial ($\Psi_m -1.500$ kPa) ($m^3 m^{-3}$); Msseco = massa do solo seco; Volume = volume da amostra de solo no anel volumétrico calculado pela expressão: $(\pi * r^2 * h) - cm^3$; θ_{AD} = água disponível as plantas ($m^3 m^{-3}$). Para a discussão dos valores de água disponível no solo, Hall et al. (1977) propôs as seguintes faixas de umidade de solo, para um solo com variação textural de fina a média: $\theta_{AD} > 0,20 m^3 m^{-3}$ = ideal; $0,15 < \theta_{AD} \leq 0,20 m^3 m^{-3}$ = bom; $0,10 < \theta_{AD} \leq 0,15 m^3 m^{-3}$ = limitante; $\theta_{AD} < 0,10 m^3 m^{-3}$ = pobre.

Segundo Reynolds (2007), um solo com $\theta_{AD} < 0.10 m^3 m^{-3}$ pode ser considerado seco ou potencialmente seco, pois não pode satisfazer a necessidade dos vegetais por água, estando ela fortemente retida nas partículas de argila do solo. A capacidade de água disponível (CAD), foi calculada usando a seguinte equação 21:

$$CAD (mm) = \theta_{AD} * \rho * Z \quad (21)$$

Onde: CAD = capacidade de água disponível no solo (mm); ρ = densidade do solo da camada avaliada; Z = espessura da camada de solo avaliada (mm).

A capacidade de campo relativa (CCr) foi determinada segundo Reynolds et al. (2007). É uma variável que representa o balanço ótimo na zona rizosférica entre a capacidade de água

no ponto de saturação (θ_s) e a capacidade de aeração do solo (CAS). A equação utilizada para obtenção da capacidade de campo relativa (CCr) segue a seguinte equação:

$$CCr = (\theta_{CC} / \theta_s) = [1 - (CAS / \theta_s)] \quad (22)$$

Onde: CCr = é a capacidade de campo relativa (adimensional); θ_{CC} = capacidade de campo, correspondente ao volume de água no potencial matricial (Ψ_m -10 kPa) ($m^3 m^{-3}$); θ_s = é o teor de umidade no solo saturado ($\Psi_m = 0$, $m^3 m^{-3}$); CAS = capacidade de aeração do solo ($m^3 m^{-3}$). Para Olness et al. (1998), a CCr ótima deve variar entre $0,6 \leq CCr \leq 0,7$, de forma que haja um balanço ótimo entre a capacidade de água e a capacidade de aeração do solo no entorno da zona radicular. Valores superiores ou inferiores aos apresentados por essa faixa resultam em redução da atividade microbiana do solo, devido ao conteúdo ineficiente de água ou ar (REYNOLDS et al., 2007), sendo os valores de referência $< 0,6$ baixo conteúdo de água; $> 0,7$ baixo conteúdo de ar.

A curva de retenção de água no solo (CRA) foi ajustada empregando-se o modelo não linear proposto por Van Genuchten (1980), utilizando o *software* SWRC – *Soil Water Retention Curve* (DOURADO NETO et al., 2000). Utilizou-se a constante de restrição de Mualem (1986). Para obtenção dos valores de umidade do solo, as amostras foram saturadas e aplicou-se os seguintes potenciais matriciais: $\Psi_m = 0, -6, -10, -33, -100, -300, -500, -1,000$ e $-1,500$ kPa. O potencial inicial (Ψ_m) = 0, corresponde ao volume de saturação θ_s da amostra de solo; o potencial de -6 kPa foi obtido através da mesa de tensão e os demais -10, -33, -100, -300, -500, -1,000 e -1,500 kPa, na câmara de Richards com placas porosas.

A equação utilizada para obtenção das curvas de retenção de água no solo encontra-se descrita a seguir:

$$\theta = \theta_R + (\theta_s - \theta_R) / [1 + (\alpha \Psi)^n]^m \quad (23)$$

Onde: θ = conteúdo volumétrico de água no solo ($m^3 m^{-3}$) correspondente ao potencial matricial aplicado (Ψ_m kPa⁻¹); θ_R = conteúdo de água residual; θ_s = conteúdo de água correspondente ao solo saturado; Ψ = valor absoluto do potencial matricial (kPa⁻¹); (n , m e α) são parâmetros empíricos da curva de retenção, com α expresso em kPa⁻¹ e n e m adimensionais.

3.6.2 Variáveis de química e fertilidade do solo

Para a determinação do teor de matéria orgânica do solo, a amostra de solo foi macerada e tamisada em peneira com malha de 80 Mesh para determinação do carbono orgânico total em solo via úmida pela oxidação com o dicromato de potássio $K_2Cr_2O_7$ ($0,0667 \text{ mol L}^{-1}$) conforme descrito em Teixeira et al. (2017). O índice de compartimentação de carbono (ICC) foi calculado através de metodologia proposta por Silva et al. (2011), utilizando o teor de carbono orgânico total do solo ($COT - g \text{ kg}^{-1}$) dos sistemas de manejo (iLPF) e de uma área de referência (floresta regenerada/ secundária). O ICC foi calculado da seguinte forma:

$$ICC = COT_{\text{cultivado}} / COT_{\text{referência}} \quad (24)$$

Onde: ICC = é o índice de compartimentação de carbono (adimensional); $COT_{\text{cultivado}}$ = teor de carbono orgânico total das áreas de cultivo ($g \text{ kg}^{-1}$); $COT_{\text{referência}}$ = teor de carbono orgânico total de uma área de referência (Floresta nativa) ($g \text{ kg}^{-1}$). Salienta-se que o sistema utilizado como referência nesse estudo (Floresta nativa), apresenta um certo grau de perturbação de origem antrópica, pois se trata de um ambiente sob estágio secundário de regeneração com vegetação predominante do tipo arbustiva. Anteriormente, a área de vegetação era classificada como resquício de mata atlântica do tipo Floresta subperenifólia aberta (VELOSO et al., 1991).

O estoque de carbono (ESTC) foi calculado conforme metodologia proposta por Veldkamp (1994) e por Fernandes e Fernandes (2008). A expressão utilizada para calcular o ESTC, encontra-se descrita a seguir 25:

$$ESTC (Mg \text{ ha}^{-1}) = (COT * \rho * e) / 10 \quad (25)$$

Onde: ESTC = é o estoque de carbono no solo ($Mg \text{ ha}^{-1}$); CO = teor de carbono orgânico encontrado na amostra de solo ($g \text{ kg}^{-1}$); ρ = densidade do solo ($g \text{ cm}^{-3}$); e = espessura da camada de solo avaliada (cm).

A partir dos valores de estoques de carbono do solo foi possível calcular a taxa de recuperação de carbono no sistema, conforme apresentado por Tivet et al. (2013), utilizando a seguinte expressão:

$$TRCS (\%) = ESTC_{\text{manejo}} / ESTC_{\text{vnat}} * 100 \quad (26)$$

Onde: TRCS = taxa de recuperação de carbono no solo (%); $ESTC_{\text{manejo}}$ = é o estoque de carbono das áreas sob manejo ($Mg\ ha^{-1}$) e $ESTC_{\text{VNAT}}$ = é o estoque de carbono do solo sob mata nativa ($Mg\ ha^{-1}$).

A estratificação de carbono (ΔEC) foi calculada conforme proposto por Franzluebbers (2002), sendo o conteúdo de carbono da camada superficial de (0-0,10 m), dividido pelos valores das camadas subsuperficiais de 0,10 a 0,20 m e de 0,20 a 0,30 m.

A medição do potencial hidrogeniônico do solo (pH) foi realizada por meio do eletrodo combinado imerso em suspensão solo/líquido, (água) na proporção de 1:2,5, conforme metodologia proposta no manual de métodos de análise de solos da Embrapa (TEIXEIRA et al. (2017). O fósforo disponível (P) foi determinado através da formação do complexo fósforo-molibdato de cor azul, obtido após redução do molibdato com ácido arcórbico. Utilizou-se a solução de Mehlich-1 ($HCl\ 0,05\ mol\ L^{-1}$ e $H_2SO_4\ 0,0125\ mol\ L^{-1}$) para a extração do fósforo e leitura realizada com espectrofotômetro UV-vis.

Os cátions trocáveis (Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+}), foram determinados utilizando solução extratora de KCL $1\ mol\ L^{-1}$ e absorção atômica. Já os elementos K^+ e Na^+ , foram extraídos da amostra de solo utilizando a solução Mehlich-1 e determinados por meio da espectrofotometria de chama. A acidez potencial do solo ($H^+ + Al^{3+}$), foi determinada utilizando o acetato de cálcio ($C_4H_6O_4Ca$) tamponado a pH 7,0 como solução extratora e NaOH na presença de fenolftaleína como indicador. Através da determinação dos elementos acima citados foi possível calcular as variáveis do complexo sortivo do solo, com destaque para a capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB) e percentagem de saturação por bases (V).

Utilizou-se como referência para fins de avaliação de teores no solo, o manual de adubação proposto para o estado de Pernambuco (CAVALCANTI, 2009).

3.7 Análise estatística dos dados

Realizou-se a análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de ($p < 0,05$). Os dados também foram avaliados através da estatística multivariada, como: análise de componentes principais (ACP) e correlação de Pearson (r) aos níveis de ($p < 0,1$; $0,05$ e $0,01$). Utilizou-se o *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4, encontram-se apresentados os valores médios para textura (areia, silte, argila), grau de floculação (GF) e a classificação textural do Planossolo Háplico, sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta, em três profundidades de solo (0,00 – 0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m).

Tabela 5. Textura e grau de floculação em Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Sistemas	Areia	Silte	Argila	GF	Textura
	----- g kg ⁻¹ -----				
0,00-0,10 m					
BI	694 a	143 a	163 a	972 a	F. Arenosa
BG	703 a	139 a	158 a	904 a	F. Arenosa
BS	686 a	152 a	162 a	919 a	F. Arenosa
BD	681 a	152 a	167 a	819 a	F. Arenosa
LA	683 a	156 a	162 a	884 a	F. Arenosa
CV %	7,72	14,03	22,66	8,44	
0,10-0,20 m					
BI	676 a	147 a	177 a	813 a	F. Arenosa
BG	696 a	144 a	160 a	816 a	F. Arenosa
BS	692 a	142 a	166 a	842 a	F. Arenosa
BD	650 a	160 a	190 a	861 a	F. Arenosa
LA	695 a	136 a	169 a	862 a	F. Arenosa
CV %	7,95	13,51	9,38	9,38	
0,20-0,30 m					
BI	625 a	164 a	211 a	641 a	F. Arenosa
BG	709 a	119 a	172 a	871 a	F. Arenosa
BS	698 a	128 a	174 a	780 a	F. Arenosa
BD	672 a	131 a	197 a	738 a	F. Arenosa
LA	638 a	142 a	220 a	712 a	F. Arenosa
CV %	---	---	---	---	

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoura anual, CV = Coeficiente de variação, GF = Grau de floculação. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Verifica-se, que não houve variação estatística significativa a ($p < 0,05$) para os atributos, areia, silte, argila e grau de floculação entre os tratamentos e camadas de solo avaliadas, observando-se forte predominância da fração Areia, que variou de 709 g kg^{-1} no tratamento BG para 625 g kg^{-1} no tratamento BI. Os teores de argila foram aumentando com a profundidade da camada de solo avaliada, encontrando-se 220 g kg^{-1} no tratamento LA, na profundidade de 0,20-0,30 m (Tabela 5). O aumento de argila em profundidade é uma característica natural dos Planossolos, que apresentam forte desargilização, com acentuada concentração de areia em superfície (SOUZA et al., 2013). É um processo natural, que ocorre na maioria dos Planossolos, principalmente em ambientes onde a precipitação pluviométrica é acentuada. A fração silte apresentou uma dinâmica contrária a fração argila, observando-se redução nos teores com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada.

Verifica-se que o grau de floculação reduziu com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada, sendo mais representativo no tratamento BI, com 972 g kg^{-1} na camada de 0,00-0,10 m e 641 g kg^{-1} na camada de 0,20-0,30 m, uma variação de 331 g kg^{-1} . A menor variação para o GF foi verificada do tratamento BG com 33 g kg^{-1} entre as camadas de 0,00-0,30 m. Vários são os fatores envolvidos na elevação do grau de floculação entre os tratamentos avaliados, primeiro, a alta concentração de elementos floculantes como Al^{+3} e H^{+} (SOUZA et al., 2006) e segundo a deposição de resíduos de forma constante através da associação entre as gramíneas e espécies florestais (GASPARETTO et al., 2007), que em conjunto promovem a cimentação de partículas, reduzem o teor de argila dispersa em água e elevam o grau de floculação.

Para Mota et al. (2015), o acentuado GF em superfície é um ponto positivo para o solo sob sistemas de integração, pois, tornam-se menos suscetíveis ao processo de degradação em função do reduzido número de obstruções de macroporos provocados pelo alto teor de argila dispersa em água (ADA). Silva et al. (2019) avaliando atributos físicos de solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta em Planossolo no Agreste da Paraíba, encontraram os mesmos valores para o GF nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m.

Para Albuquerque et al. (2005) o que pode reduzir o grau de floculação do solo é a diferença entre o ponto de efeito salino nulo e o pH do solo, para eles, quanto maior for a diferença entre esses dois parâmetros, maior será a tendência de prevalecer forças de repulsão sobre as de aproximação das partículas, resultando em menor GF. O maior grau de floculação observado em superfície está relacionado a uma ação conjunta entre a matéria orgânica, atividades microbianas, sistema radicular, cátions trocáveis e a ação dos ciclos de umedecimento e secagem do solo (ALBUQUERQUE et al., 2000). A alta concentração de sódio

no Planossolo favorece a capacidade de retenção de água, contudo esse efeito ocasiona uma série de problemas negativos, com elevação no conteúdo de argila dispersa em água que em função do seu raio, migram para os macroporos do solo ocasionando a formação de camadas adensadas (FARAHANI et al., 2018).

No ciclo de secagem do solo, os íons e colóides do solo migram dos locais de maior energia para os locais com menor energia de solução (do concentrado para o menos concentrado), aumentando a força de energia entre as partículas (KEMPER et al., 1987). A redução do GF em profundidade (Tabela 5) vai de acordo com o observado por Santos et al. (2013) onde para eles essa ação está relacionada ao aumento nos teores de sódio com o aumento de profundidade do perfil. A elevação no grau de flocculação em subsuperfície está relacionado as más condições de drenagem do solo, que promovem maior hidratação das partículas de argila, que reduzem as forças de adesão e coesão (SANTOS et al., 2013).

O menor grau de dispersão de argila em superfície, que posterior aumento do GF pode estar relacionada aos maiores teores de cálcio e magnésio, enfatizando que cátions polivalentes formam pontes de cátions com partículas carregadas com carga negativa, favorecendo o processo de agregação do solo (RENGASAMY, 1983; MATOS et al., 2014). A presença de sódio (cátion monovalente) – promove aumento na espessura da dupla camada difusa, que ocasiona a expansão das partículas de argila (FASSBENDER; BORNEMISZA, 1987), elevando o processo de dispersão, que ocasiona a formação de camadas subsuperficiais impermeáveis, comprometendo a difusão de ar e água no solo (ROLSTON et al., 1984). Geralmente isso acontece quando o percentual de sódio trocável no solo é superior a 15% (BOSCO, 2006).

Em todos os tratamentos avaliados (Tabela 5), observa-se que o solo da área experimental recebeu a classificação franco-arenosa, independente da camada avaliada. Apesar da textura ser um atributo estável, a predominância de areia pode não ser um fator benéfico para o Planossolo avaliado, em consequência de problemas relacionados à baixa retenção de água e absorção de nutrientes (LIMA et al., 2012), principalmente para espécies com sistema radicular superficial. Para Gazzola et al. (2015), uma solução encontrada para reduzir os problemas físicos relacionados ao elevado teor de areia no solos é a implantação de sistemas integrados de produção, por favorecer a manutenção de resíduos vegetais em superfície ao longo do ciclo de cultivo.

Na Tabela 6, verificam-se os valores médios para os atributos físicos relacionados ao espaço poroso do solo, α (porosidade total calculada), α_{Est} (porosidade total estimada),

macroporosidade, microporosidade, θ_{CAR} (capacidade de aeração relativa) e CAS – capacidade de aeração do solo.

Tabela 6. Distribuição de poros e capacidade de aeração em Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Sistemas	α	α_{Est}	Ma	Mi	θ_{CAR}	CAS
----- m ³ m ⁻³ -----						
0,00-0,10 m						
BI	0,48 a	0,45 a	0,10 a	0,37 a	0,38 a	0,21 a
BG	0,48 a	0,42 a	0,12 a	0,35 a	0,38 a	0,21 a
BS	0,48 a	0,44 a	0,11 a	0,37 a	0,38 a	0,23 a
BD	0,50 a	0,42 a	0,15 a	0,34 a	0,40 a	0,18 a
LA	0,49 a	0,44 a	0,13 a	0,36 a	0,39 a	0,23 a
CV %	3,2	5,5	19,1	7,1	4,0	19,4
0,10-0,20 m						
BI	0,46 a	0,38 a	0,14 a	0,32 a	0,36 a	0,15 a
BG	0,47 a	0,42 a	0,10 a	0,36 a	0,37 a	0,20 a
BS	0,46 a	0,40 a	0,11 a	0,35 a	0,36 a	0,20 a
BD	0,48 a	0,41 a	0,14 a	0,33 a	0,38 a	0,15 a
LA	0,46 a	0,40 a	0,14 a	0,33 a	0,36 a	0,18 a
CV %	3,6	4,7	19,1	7,1	4,0	19,4
0,20-0,30 m						
BI	0,44 a	0,39 a	0,14 a	0,30 b	0,34 a	0,16 a
BG	0,45 a	0,40 a	0,10 a	0,35 a	0,35 a	0,17 a
BS	0,45 a	0,38 a	0,12 a	0,34 ab	0,35 a	0,16 a
BD	0,47 a	0,40 a	0,12 a	0,33 ab	0,37 a	0,18 a
LA	0,46 a	0,43 a	0,11 a	0,34 ab	0,36 a	0,20 a
CV %	2,3	4,3	15,2	4,2	3,0	9,3

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoua anual, CV = Coeficiente de variação, GF = Grau de floculação. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Houve variação estatística significativa ($p < 0,05$) para o atributo microporosidade (Mi) na camada avaliada de 0,20-0,30 m, destacando-se o tratamento BG com 0,35 m³ m⁻³ com a melhor média observada; a menor média foi verificada no tratamento BI - 0,30 m³ m⁻³, que não

diferiu estatisticamente dos demais tratamentos avaliados (BS, BD e LA). As demais variáveis analisadas não apresentaram diferença estatística significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos e camadas de solo avaliadas (Tabela 6), contudo os valores médios observados ficaram acima do limite crítico mínimo, requerido para o desenvolvimento satisfatório dos vegetais (REICHERT et al., 2008).

A porosidade total calculada (α) variou de 0,45 a 0,50 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ sendo maior no tratamento BD na profundidade de 0,00-0,10 m; a porosidade total estimada (α_{Est}) apresentou uma tendência de aumento no tratamento BI na camada de 0,00-0,10 m, com variação de 0,38 a 0,45 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ entre as três camadas de solo avaliadas. Esses dados corroboram com os apresentados por Silva et al. (2016) em trabalho sobre atributos físicos de solo em sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no estado do Pará, onde observaram maiores valores para α na camada de 0,00-0,10 m. A maior concentração de poros em superfície é proporcionada pelo volume de raízes (SILVA; MARTINS, 2010) e o não revolvimento contínuo do solo (SANTOS et al., 2011), que em associação com os invertebrados contribuem para a melhoria estrutural do solo (SILVA et al., 2016).

A macroporosidade variou de 0,10 – 0,15 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, apresentando o maior valor médio no tratamento BD na camada de 0,00-0,10 m. A capacidade de aeração relativa - θ_{CAR} – variável que corresponde ao teor de umidade para que a capacidade de aeração do solo seja de no mínimo 10% (Tabela 6) apresentou uma variação de 0,34 a 0,40 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, sendo superior no tratamento BD na camada de 0,00-0,10 m. Verifica-se na Tabela 6, que a capacidade de aeração do solo variou de 0,15 a 0,23 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, sendo superior na camada de 0,00-0,10 m.

A maior concentração de valores médios na camada de 0,00-0,10 m está relacionado a maior deposição de resíduos vegetais, maior atividade microbiana e onde está concentrado o maior volume de raízes. Na Tabela 6, verifica-se que a porosidade total do solo foi obtida de duas maneiras 1) α calculada – obtida através da relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas e 2) α_{Est} estimada – obtida através da umidade correspondente ao volume de saturação do solo. Há uma diferença marcante para a porosidade total calculada das duas maneiras, observando que os maiores valores médios foram obtidos através da α calculada.

O tratamento com as maiores variações para o atributo porosidade total (calculada e estimada) foi o BD, verificando-se diferença de 0,08 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0,00-0,10; 0,07 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0,10-0,20 e 0,07 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0,20-0,30. Nesse caso, pode-se afirmar que a porosidade total calculada (α) é a forma mais expressiva para a determinação da porosidade total do solo, para Planossolo Háplico, pois, os valores médios são superiores aos valores verificados quando a variável é obtida através da porosidade estimada. Esses dados

podem ser confirmados através do coeficiente de variação encontrado para as três camadas de solo avaliadas (3.2, 3.6 e 2.3) para as camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente, ante aos valores de CV verificados para a α Est (5.5, 4.7 e 4.3).

Souza Neto et al. (2014) trabalhando com avaliação de atributos físicos de solo no bioma Cerrado observaram redução da porosidade total com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada, para eles, essa redução está ligada ao aumento de densidade do solo em profundidade. Nota-se na Tabela 6, o mesmo comportamento para a porosidade total, independente da forma de obtenção da variável, que houve redução com o aumento de profundidade. A manutenção da porosidade total acima do limite crítico é fundamental para o bom funcionamento do solo, pois, são responsáveis pelos processos de difusão de água e ar no solo, influenciado a condução e retenção de água, resistência mecânica a penetração, ramificação de raízes e aproveitamento de água pelas plantas (RIBEIRO et al., 2007).

Quanto a macroporosidade, observa-se que ela se manteve acima do limite crítico em todos os tratamentos avaliados, que segundo Taylor e Ashcroft (1972) e Reichert et al. (2007) é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Nos tratamentos BI na profundidade de 0,0-0,10 e BG nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30, foi possível observar que a macroporosidade estava no limite mínimo aceitável. Esses dados de assemelham aos obtidos por Assis et al. (2019) trabalhando com atributos físicos, químicos e biológicos do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no estado do Mato Grosso, eles verificaram variação para a Ma entre 0,06 e $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

No tratamento BD – apesar de não significativa, observa-se que o aumento da macroporosidade está relacionado ao crescimento do sistema radicular da gramínea, que geralmente é bem agressivo, como observado por Oliveira et al. (2018). Estes autores concluíram que as gramíneas exercem forte influência sobre a macroporosidade do solo, pois se trata de um atributo estrutural, geralmente sensível às práticas de manejo do solo. Em sistemas integrados de produção agropecuária, observa-se que os poros apresentam estruturas contínuas bem distribuídas no espaço, destacando-se os valores expressivos de biporos e macroporos (NASCIMENTO et al., 2018). Segundo os mesmos autores, este fato está relacionado à ação das raízes das árvores perenes em associação com os microrganismos.

O mesmo foi observado por Prevedello et al. (2013), para eles o acúmulo de grandes quantidades de resíduos orgânicos e raízes em superfície favorece o rompimento das camadas de solo compactadas que, junto a atividade dos microrganismos, atua na redução da densidade e eleva o volume de poros do solo. A ação das raízes das plantas nos sistemas integrados de produção sobre a formação e manutenção de poros estruturais é de grande importância para os

solos nas épocas mais secas do ano, principalmente sistemas de produção agropecuária, pois contribui com a taxa de infiltração e armazenamento de água nas camadas mais profundas do solo (NASCIMENTO et al., 2018).

Meek et al. (1989) avaliando a distribuição do diâmetro de poros em solo cultivado com alfafa (*Medicago sativa*), observaram que após três anos de plantio as espécies favoreceram a formação de 100 canais por m² de área e desse total 68% apresentavam diâmetro entre 0,5 e 2,5 mm e 8% maiores que 4,5 mm. Esses resultados demonstram a importância das raízes na formação dos poros do solo, principalmente dos macroporos e bioporos (> 50 µm = 0,05 mm), que quando bem distribuídos elevam as taxas de infiltração de água no solo (JARVIS, 2007) e favorecem a ação dos micorganismos.

A microporosidade não foi estatisticamente significativa nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m para os tratamentos avaliados e variou de 0,32 a 0,37 m³ m⁻³. Houve redução com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada, destacando-se o tratamento BI por apresentar a menor Mi entre os tratamentos avaliados. Na camada de 0,20-0,30 m, observa-se que houve variação estatística significativa ($p < 0,05$), destacando-se o tratamento BG com $Mi = 0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Assis et al. (2015) trabalhando com avaliação de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, observaram diferença estatística para a Mi na camada subsuperficial de 0,10-0,20 m.

Os valores médios de microporosidade verificados no presente estudo foram superiores aos verificados por Carvalho et al. (2016) trabalhando com a evolução de atributos físicos, químicos e biológicos de um Planossolo Háptico hidromórfico sob sistema de integração lavoura-pecuária no bioma Pampa. A microporosidade é um atributo chave para a manutenção de qualidade do solo, principalmente no que se refere a retenção de água, contudo, é um atributo dependente da granulometria do solo, também conhecido como porosidade textural, sendo assim, as práticas de manejo pouco alteram sua distribuição dentro de uma mesma área de avaliação (RAMOS et al., 2014; ROSA et al., 2018).

Enfatiza-se que houve um aumento expressivo da microporosidade nos tratamentos e camadas de solo avaliadas, em comparação com os resultados apresentados por Silva et al. (2019), avaliando a disponibilidade de água no solo para o mesmo sistema integrado de produção agropecuária no ano de 2017. Um intervalo curto, de dois anos, porém bastante expressivo. Outros autores como Carvalho et al. (2016) e Spera et al. (2009) também observaram um aumento expressivo da microporosidade do solo após dois anos de manejo com sistema de integração, para eles esse fato está relacionado ao aumento do conteúdo de matéria orgânica do solo.

O aumento expressivo da microporosidade do solo foi acompanhada de redução na macroporosidade, contudo pouco expressiva sobre a porosidade total. Como já salientado anteriormente, a macroporosidade é um atributo sensível as práticas de manejo do solo, por se tratar de um atributo estrutural e, como a área estava sob pastejo bovino dias antes da coleta de amostra para a avaliação dos atributos físicos, o pisoteio animal pode ter resultado em redução da Ma nas camadas de solo avaliadas. Para Barros et al. (2018), a compressão ocasionada pelo pisoteio animal, ou mesmo pelos maquinários em superfície, ocasionam mudanças estruturais no solo, com posterior redução da macroporosidade. Contudo, o impacto ocasionado pelo pisoteio animal não ultrapassa a camada superficial de 0,00-0,10 m, e quando ultrapassam, os atributos não atingem valores que possam limitar o desenvolvimento das plantas (CONTE et al., 2011; BONETTI et al., 2015).

A capacidade de aeração relativa do solo (θ_{CAR}) – variável que caracteriza o valor de umidade do solo para que haja um mínimo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de espaços porosos ocupados por ar, não variou estatisticamente ($p < 0,05$) entre os tratamentos e camadas de solo avaliadas, comportamento este foi seguido pela capacidade de aeração do solo CAS. As variações para a (θ_{CAR}) foram de 0,18-0,38 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 0,00-0,10; 0,36 a 0,38 e 0,34 a 0,36 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Para a capacidade de aeração do solo, variável que representa o volume de espaços vazios do solo entre a saturação e a capacidade de campo variou de 0,18-0,21; 0,15-0,20 e 0,16-0,20 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Tabela 6).

Verifica-se na Tabela 6, que houve redução da (θ_{CAR}) e CAS com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada, comportamento esse seguido de redução na macroporosidade com o aprofundamento das camadas de solo avaliadas. Observa-se que os valores de CAS ficaram acima do limite crítico restritivo para solos de textura arenosa, que segundo Carter (1998) é de $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Contudo, no Brasil, alguns autores como Tormena et al. (2002), Leão (2002) e Reichert et al. (2007) usam o valor médio de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ como referência para que haja um equilíbrio mínimo entre o volume de água e a difusão de gases no solo. Assis et al. (2016) encontraram valores médios de CAS variando de 0,19 a 0,40 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo menor na área sob pastagem.

Quando a porosidade de aeração é menor que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, a taxa de fluxo de oxigênio em direção ao sistema radicular das plantas é severamente prejudicada, afetando assim, os processos fisiológicos e metabólicos responsáveis pelo crescimento e desenvolvimento do sistema radicular dos vegetais (STEFANOSKI et al., 2013). Quanto a capacidade de aeração relativa (Tabela 7), observa-se que para se atingir o limite mínimo de poros ocupados por ar, na

camada de 0,00-0,10 seria necessário um acúmulo de água mais expressivo, por conta da maior concentração de macroporos em superfície.

Os dados demonstram que em superfície, o solo apresenta uma maior capacidade de armazenamento de água, na capacidade de campo, por conta da maior quantidade de espaços porosos livres. Outro fato observado é que existe um equilíbrio expressivo entre a saturação e a aeração do solo nas camadas superiores, ou seja, as raízes teriam menos restrição para se desenvolver nas camadas superficiais do solo. Nascimento et al. (2019) avaliando a qualidade do solo manejado sob sistema integrado de longa duração não verificaram valores significativos para a capacidade de aeração do solo, com valores variando de 0,15 a 0,18 na camada de 0,00 – 0,30 m.

Nascimento (2017) verificou que não houve variação estatística significativa para a capacidade de aeração do solo entre os sistemas avaliados, contudo o menor valor médio foi verificado no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, contudo sem grandes comprometimentos para a qualidade física do solo. O volume de poros acima do limite crítico reduz a possibilidade de estresses para as plantas (KLEIN et al., 2018), principalmente em solos que apresentam restrição físico-hídrica durante boa parte do ano, a exemplo dos Planossolos Háplicos hidromórficos.

Na Tabela 7, encontram-se os valores médios para densidade do solo (ρ), densidade máxima do solo (ρ_{max}), densidade relativa (ρ_R), grau de compactação estimado (GCE) e condutividade hidráulica saturada (K_θ). Não houve variação estatística significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos avaliados. A (ρ) variou de 1,31 a 1,45 g cm⁻³, a (ρ_{max}) de 1,79 a 1,84 g cm⁻³, a (ρ_R) – adimensional, variou de 0,72 a 0,80; o GCE de 72,4 a 80,8% e a (K_θ) de 2,60 a 14,91 cm h⁻¹.

Conforme destacado na Tabela 7, houve aumento da densidade do solo e grau de compactação com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada e redução da condutividade hidráulica saturada. As demais variáveis densidade máxima do solo e densidade relativa, praticamente se mantiveram estáveis, com CV variando de 1,1 a 1,3 para a (ρ_{max}) e 2,4 a 3,1 para a (ρ_R).

Tabela 7. Densidades (real, máxima, relativa), grau de compactação e condutividade hidráulica saturada em Planossolo Háplico sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no agreste da Paraíba.

Sistemas	ρ	ρ_{max}	ρ_R	GCE	K_0
	----- g cm ⁻³ -----	-----	-----	---- % ----	--- cm h ⁻¹ ---
0,00-0,10 m					
BI	1,37 a	1,81 a	0,75 a	75,9 a	14,61 a
BG	1,37 a	1,84 a	0,74 a	74,4 a	5,31 a
BS	1,35 a	1,83 a	0,73 a	73,9 a	8,44 a
BD	1,31 a	1,81 a	0,72 a	72,4 a	5,86 a
LA	1,33 a	1,82 a	0,73 a	73,0 a	8,44 a
CV %	3,1	1,2	3,1	3,1	124,9
0,10-0,20 m					
BI	1,41 a	1,79 a	0,78 a	78,8 a	6,32 a
BG	1,38 a	1,84 a	0,75 a	75,0 a	3,96 a
BS	1,41 a	1,82 a	0,77 a	77,4 a	3,15 a
BD	1,36 a	1,82 a	0,75 a	75,0 a	4,42 a
LA	1,40 a	1,82 a	0,77 a	77,0 a	4,39 a
CV %	3,3	1,1	4,1	3,9	79,9
0,20-0,30 m					
BI	1,45 a	1,79 a	0,80 a	80,8 a	2,60 a
BG	1,44 a	1,82 a	0,79 a	79,0 a	2,77 a
BS	1,43 a	1,81 a	0,78 a	78,9 a	2,63 a
BD	1,40 a	1,82 a	0,77 a	77,5 a	2,97 a
LA	1,41 a	1,82 a	0,77 a	77,0 a	3,23 a
CV %	2,0	1,3	2,4	2,4	33,3

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoura anual, CV = Coeficiente de variação, ρ = Densidade do solo, ρ_{max} = Densidade máxima, ρ_R = Densidade relativa, GCE = Grau de compactação estimado, K_0 = Condutividade hidráulica saturada. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A densidade do solo ficou abaixo do limite crítico em todos os tratamentos e camadas avaliadas, que segundo Reynolds et al. (2007) é de 1,4 a 1,6 g cm⁻³. A densidade relativa deve variar de 0,71 a 0,88 (KLEIN, 2006), observa-se portanto que todos os tratamentos ficaram dentro do limite estabelecido, com o maior valor médio de 0,80 no tratamento BI, na camada

de 0,20-0,30 m. Como o GCe é estimado através da densidade relativa, observa-se um valor médio restritivo para no tratamento BI = 80,8% na camada de 0,20-0,30 m, nas demais camadas, o GCe ficou abaixo do limite crítico, que segundo Beutler (2005) é de 80,0%. A (ρ_{max}) que corresponde ao valor máximo de densidade do solo não variou entre os tratamentos avaliados, contudo, verifica-se que o menor valor médio foi de $1,79 \text{ g cm}^{-3}$.

A condutividade hidráulica saturada variou de moderada a rápida e de lenta a moderada, conforme proposto por Soil Survey Staff (1993) $> 25,4 \text{ cm h}^{-1}$ = muito rápida; $25,4 \geq K_{\theta} > 12,7$ = moderada a rápida; $12,7 \geq K_{\theta} > 6,35$ = moderada; $6,35 \geq K_{\theta} > 2,0$ = lenta a moderada; $2,0 \geq K_{\theta} > 0,5$ = lenta; $K_{\theta} < 0,5$ = muito lenta. O maior e o menor valor médio foram verificados no tratamento BI, com 14,61 na camada de 0,00-0,10 m e $2,60 \text{ cm h}^{-1}$ na camada de 0,20-0,30 m respectivamente, uma redução de $12,01 \text{ cm h}^{-1}$ com o aumento de profundidade (Tabela 7). A redução na condutividade hidráulica saturada foi proporcional ao aumento da (ρ) e do GCe.

Salles et al. (2018), avaliando a qualidade física do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, observaram redução da K_{θ} com elevação na profundidade da camada de solo avaliada, para eles, esse fato deve à redução na atividade dos microrganismos em subsuperfície, com reflexos na redução da Ma e bioporosidade do solo. No presente estudo, observa-se que diminuição na condutividade hidráulica saturada do solo foi proporcional a redução da Ma do solo em subsuperfície, pois, os macroporos são responsáveis pela dinâmica de água no solo.

O mesmo comportamento foi verificado por Nascimento et al. (2019) avaliando atributos físicos de solo em sistemas integrados de produção agropecuária, com a densidade do solo aumentando com elevação de profundidade na camada de solo avaliada. O mesmo também foi observado por Cavenge et al. (1999), Reinert et al. (2008), Sousa Neto et al. (2014) e Gubiani et al. (2015), para eles o aumento de densidade do solo em função da profundidade está relacionado ao uso intenso de implementos e práticas agrícolas inadequadas no solo. O acompanhamento da (ρ) deve ser realizado durante o planejamento das safras, pois, se os valores médios estiverem acima do limite crítico, a densidade ocasiona o comprometimento do desenvolvimento dos vegetais, principalmente pela redução na capacidade de aeração do solo e aumento do potencial matricial para sucção da solução do solo pelas plantas (KLEIN, 2006).

Poucos são os estudos com longo tempo de duração, que avaliem o impacto do pisoteio animal sobre a qualidade física do solo (STEFANOSKI et al., 2013). Moreira et al. (2012), ao avaliar a densidade do solo, concluíram que, após oito anos de implantação do sistema de integração lavoura-pecuária, não se confirmou que o aumento do pisoteio animal diminui a qualidade física do solo. Comparando-se com os resultados observados por Silva et al. (2019),

houve um acréscimo dos valores médios de densidade do solo quatro anos após a instalação do experimento e dois anos após a primeira avaliação.

O pisoteio animal em superfície e a utilização de implementos agrícolas no manejo das pastagens e das parcelas com lavoura-anual (LA) elevaram a densidade do solo com o passar do tempo, contudo os valores observados não são limitantes para as plantas, pois estão distantes do valor máximo restritivo. Apesar desse resultado, é nítida a melhoria da qualidade física do solo com o passar do tempo em solos sob sistemas integrados de produção, Macedo (2009) observou redução da porosidade do solo com a implantação do sistema. Se comparado ao impacto ocasionado pelo maquinário em superfície, o pisoteio animal, mesmo que de forma elevada não altera os valores de densidade do solo, até que se atinja os limites críticos (BONETTI et al., 2015). Em um experimento com diferentes arranjos de Paricá (*Ochroma pyramidale*) como componente florestal em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, Magalhães et al. (2018) não observaram variação estatística significativa para a densidade do solo até a profundidade avaliada de 0,20 m.

As mudanças na densidade do solo demandam tempo e sistemas de manejo eficientes, com baixo revolvimento do solo. Pauletto et al. (2005), não observaram mudanças significativas para a densidade do solo em Gleissolo manejado após três anos de implantação do plantio direto. Enquanto Pedrotti (1996), observaram aumento da densidade do solo após 10 anos de implantação de experimento do solo com revolvimento contínuo. No tratamento LA a (ρ) pouco variou e se manteve abaixo do limite crítico (Tabela 7), resultado esse relacionado a eficiência do consórcio entre milho e *Brachiaria* na melhoria física do solo. Trabalhos como o de Assis et al. (2019) encontraram melhorias significativas na qualidade física do solo após quatro anos de instalação do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no estado de Mato Grosso.

Verifica-se que há uma relação direta entre a porosidade total e a densidade do solo (Tabelas 6 e 7), pois, quando maior a (α) menor a (ρ). Esses dados corroboram com os verificados por Maia et al. (2018) avaliando atributos físicos de solo em Latossolo Vermelho, para eles essa redução de densidade está relacionada ao aumento de porosidade total do solo, que é ocasionado pelo efeito da matéria orgânica do solo. Geralmente o aumento de densidade do solo compromete a macroporosidade do solo, por ser sensível as mudanças de manejo do solo. Para muitos autores a (ρ) pode ser utilizada como um bom indicador de qualidade do solo, pois se correlaciona com outros atributos de grande importância para o funcionamento do solo como porosidade, condutividade hidráulica, difusão de gases, retenção de água, resistência à penetração e estoque de carbono.

De acordo com Imhoff et al. (2000), a densidade do solo juntamente com a análise de resistência mecânica à penetração e a umidade, podem ser utilizadas para fazer inferências sobre a condição estrutural do solo, de forma a prever as relações entre a densidade crítica e o crescimento das raízes das plantas. A densidade crítica é aquela representada pela (ρ_{max}) do solo e varia em função da textura e teor de matéria orgânica. A (ρ_{max}) do solo não variou de forma significativa entre as camadas de solo, contudo observou-se o valor médio de $1,82 \text{ g cm}^{-3}$ na camada de 0,00-0,10 e 1,81 para as camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente.

Nesse contexto, pode-se afirmar que durante as análises de rotina, se forem observados valores de densidade próxima ao limitante (ρ_{max}), o solo pode estar com sua qualidade física e estrutural completamente comprometida, principalmente no que diz respeito aos processos dinâmicos do solo como aeração, condutividade hidráulica e o crescimento das raízes. Esses também servem de referência para o cálculo do grau de compactação do solo, que podem prever o percentual de compactação do meio em relação ao seu máximo (SUZUKI et al., 2017).

Informações sobre a (ρ_{max}) para os solos que predominam no estado da Paraíba são escassos, o que dificulta a determinação do grau de compactação do solo, através de métodos indiretos, já que a outra forma para obtenção desses parâmetros é realizada através do ensaio de Proctor. Contudo, esse tipo de ensaio é pouco usual nos laboratório de análise de solo para fins agrônômicos e exige uma amostra relativamente grande de solo para a sua determinação (4 kg), por isso vários autores tem sugerido a utilização de outros índices para determinação do grau de compactação do solo através da densidade máxima (BRAIDA et al., 2006).

Braida et al. (2006) encontraram uma densidade máxima de $1,870 \text{ g cm}^{-3}$ em um Argissolo de textura franco-arenosa, um pouco superior aos valores médios verificados pelo presente estudo. Para ele, a redução dos valores médios de densidade máxima do solo está relacionada ao aumento do teor de matéria orgânica do solo, que além de dissipar em 30% a energia de compactação do solo, aumenta o teor de água necessário para se atingir a densidade máxima. A matéria orgânica apresenta uma área de superfície específica variando de 8×10^5 a $9 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, enquanto que as partículas de areia apresentam superfície específica $< 60 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, favorecendo maior retenção de água pelas partículas de MOS, reduzindo o efeito lubrificante da água sobre as partículas minerais, elevando a capacidade de coesão (BRAIDA et al., 2006).

Para Figueirêdo et al. (2000) a ausência de significância para a densidade máxima do solo entre os tratamentos pode estar relacionada, a ausência de MOS e argila entre os tratamentos avaliados. O que pode ter acontecido nesse estudo, pois, como a textura,

propriedade que representa a distribuição das partículas minerais do solo, tomando como base o seu diâmetro equivalente, é estável (MARCOLIN; KLEIN, 2011), pode influenciar então, na distribuição espacial dos valores médios de (ρ_{\max}) entre os tratamentos avaliados.

Para a (ρ_R) – observa-se que todos os valores permaneceram dentro da faixa de limite e, aumentaram conforme a elevação na profundidade do solo (Tabela 7). Esses valores ficaram abaixo do valor médio encontrado por Liepic (1991), avaliando o efeito da densidade relativa do solo rendimento da soja, encontrando o valor crítico de 0,91 e 0,80 na condição de campo por Beutler et al. (2005). Os valores médios de densidade na camada de 0,00-0,10 m, estão relacionados ao teor de matéria orgânica, que é mais elevado em superfície; a MOS ocasiona efeitos positivos na estrutura do solo, em função dos valores de densidade, que são menores da MOS em relação aos sólidos minerais do solo (LIBARDI, 2005).

Para Marcolin e Klein (2011) as densidades máxima e relativa de solos arenosos, geralmente são mais elevadas, em função da baixa coesão apresentada pelas partículas, e comparando os dois métodos de obtenção: Ensaio de Proctor normal e função de pedotransferência (FTP), eles observaram que não há variação entre a população de dados entre os mesmos ao nível de ($p < 0,05$), portanto, a utilização da FTP, enquadra-se como um método seguro para a obtenção das (ρ_{\max}) e (ρ_R) do solo.

Essa afirmação pode ser validada pelos valores baixos de coeficiente de variação encontrados para a análise de densidade relativa, (3,3; 4,1 e 2,4%), para as camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. De acordo com Rossetti e Centurion (2017) existe uma relação direta entre a densidade do solo e a densidade relativa do solo e seus valores críticos restritivos ao crescimento da cultura, vai depender da classe textura, da mineralogia, do teor de matéria orgânica e da umidade crítica de compactação do solo. Suzuki et al. (2013), por exemplo, verificaram que a soja (*Glycine max*) atingiu sua produtividade máxima com (ρ_R) = 0,80 em um Latossolo vermelho com os teores de argila variando de 463 a 654 g kg⁻¹.

Seguindo o comportamento das (ρ_{\max}) e (ρ_R), o GCe não apresentou variação estatística significativa entre os tratamentos, encontrando-se o valor máximo de 80,8% para o tratamento BI na camada de 0,20-0,30 m. Para Cortez et al. (2018) a elevação do GCe em profundidade é reflexo do impacto mecânico proveniente da utilização de implementos agrícolas e do pisoteio animal em superfície.

Na Tabela 8, encontram-se os valores médios dos atributos macroagregados úmidos e secos (MacroU e MacroS), microagregados úmidos e secos (MicroU e MicroS), diâmetro médio ponderado dos agregados úmidos e secos (DMPAu e DMPAs) e o índice de estabilidade de agregados do solo.

Tabela 8. Distribuição, diâmetro médio ponderado e índice de estabilidade de agregados em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Sistemas	MacroU	MicroU	MacroS	MicroS	DMPAu	DMPAs	IEA
	----- % -----			--- mm ---		----	
0,00-0,10 m							
BI	73,7 a	26,3 a	79,6 a	20,4 a	1,70 a	2,04 a	0,711 a
BG	66,3 a	33,6 a	77,5 a	22,5 a	1,60 ab	2,31 a	0,528 a
BS	58,1 a	41,9 a	76,8 a	23,2 a	1,16 ab	1,91 a	0,533 a
BD	60,6 a	39,4 a	76,5 a	23,4 a	1,21 ab	2,25 a	0,544 a
LA	61,4 a	38,6 a	69,2 a	30,8 a	0,993 b	2,21 a	0,472 a
CV %	12,7	22,7	6,6	20,9	18,3	18,7	23,4
0,10-0,20 m							
BI	52,0 a	48,0 a	79,7 a	20,4 a	1,36 a	2,29 a	0,598 a
BG	70,7 a	29,3 a	84,2 a	15,8 a	1,09 a	1,97 a	0,485 a
BS	51,3 a	48,7 a	79,2 a	20,8 a	0,880 a	2,18 a	0,417 a
BD	62,0 a	38,0 a	78,3 a	21,7 a	1,03 a	2,17 a	0,488 a
LA	65,0 a	35,0 a	79,9 a	20,1 a	0,810 a	1,90 a	0,448 a
CV %	12,8	19,4	8,1	33,0	21,5	16,7	21,3
0,20-0,30 m							
BI	56,1 a	43,9 a	81,4 ab	18,6 ab	1,08 a	2,51 a	0,433 a
BG	62,3 a	37,7 a	69,2 b	30,8 a	0,866 a	1,96 ab	0,444 a
BS	59,3 a	40,7 a	70,5 ab	29,4 ab	0,899 a	2,46 a	0,374 a
BD	58,9 a	41,1 a	86,2 a	13,8 b	1,15 a	2,39 a	0,471 a
LA	64,3 a	35,7 a	78,3 ab	21,7 ab	1,07 a	1,53 b	0,705 a
CV %	17,6	26,6	7,4	25,1	32,6	13,6	29,6

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoua anual, CV = Coeficiente de variação. MacroU = Macroagregados úmidos, MicroU = Microagregados úmidos, MacroS = Microagregados secos, MicroS = Microagregados secos, DMPAu = Diâmetro médio ponderado de agregados úmidos, DMPAs = Diâmetro ponderado de agregados secos, IEA = Índice de estabilidade de agregados. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Houve variação estatística significativa ao nível de ($p < 0,05$) para DMPAu na camada de 0,00-0,10 m e MacroS, MicroS e DMPAs para a camada de 0,20-0,30 m, entre os tratamentos

avaliados. Conforme apresentado na Tabela 8, o tratamento com maior valor médio para o atributo DMPAu foi o BI = 1,70 mm e o menor valor médio foi verificado no LA = 0,993 mm. Para a camada de 0,20-0,30 m, verificou-se que o tratamento BD apresentou 86,2% de macroagregados secos, frente aos 60,2% do BG (Tabela 8). Para o percentual de MicroS, o tratamento BG apresentou um valor médio de 30,8, enquanto no BD verificou-se o menor valor médio 13,8. Para o diâmetro médio ponderado de agregados secos, o tratamento BI foi superior aos demais com 2,51 mm, frente ao LA com 1,53.

De todos os tratamentos avaliados, o BI apresentou um DMPAs de 2,51 mm na camada subsuperficial de 0,20-0,30 m, valor esse superior ao mínimo requerido para Planossolo Háplico, que segundo Lima et al. (2008) é de 2,49 mm. Observa-se que não houve variação estatística significativa para o IEA, contudo os valores reduziram com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada. Os valores médios em superfície estão relacionados à maior deposição de MOS e a distribuição do sistema radicular das gramíneas. Como Salientado na Tabela 5, houve redução do GF do solo com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada, refletindo na baixa estabilidade de agregados do solo avaliado.

Os tratamentos com maior percentual de microagregados úmidos foram: BS, BD e BI (Tabela 8), verificando-se o valor de 48,7% de microagregados úmidos para o BS na camada de 0,10-0,20 m. Esse resultado demonstra que o solo no tratamento BD apresenta baixa estabilidade estrutural, com a predominância de microagregados menores que 2 mm. O tratamento com menos predominância de microagregados úmidos foi o BI na profundidade de 0,00-0,10 m, resultado esse proveniente da agregação promovida pela deposição constante da MOS da (*Brachiaria decumbens*). Para Watts et al. (1997), as pastagens normalmente incrementar o teor de matéria orgânica do solo, com posterior melhoria na estabilidade de agregados do solo.

Os valores médios de microagregados encontrados nesse estudo foram menores que os encontrados por Lima et al. (2008), avaliando atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo comparados ao campo nativo. Para eles, a maior concentração de microagregados nos sistemas manejados em relação ao campo nativo, se deve ao fato de que, nas áreas sem perturbação (campo nativo), há predominância de grandes quantidades de matéria orgânica e raízes, as quais contribuem para a formação de agregados, pela aproximação das partículas minerais do solo.

A agregação do solo depende de inúmeros fatores, dentre eles os agentes cimentantes como polissacarídeos, e os agentes temporários como as raízes e as hifas de fungos, cátions

associados a compostos aromáticos recalcitrantes, adsorvidos a polímeros, que são agentes persistentes, permanecendo de forma diferenciada no solo (TISDALL; OADES, 1982).

Observa-se que houve aumento no percentual de microagregados do solo com o aumento de profundidade da camada, para todos os tratamentos avaliados, caracterizando baixa estabilidade estrutural com o aumento de profundidade. A formação de agregados estáveis está relacionado as concentrações da fração humificada da MOS, que representa 2/3 do teor de carbono do solo (SILVA; MENDONÇA, 2007) e, em sistemas de produção sustentáveis como Na integração lavoura-pecuária-floresta, observa-se que uma alta deposição da MOS com o tempo, favorecendo dessa forma a formação de agregados.

Souza et al. (2019) verificaram melhorias na formação e no diâmetro médio de agregados do solo após 12 anos de implantação do sistema plantio direto, uma melhoria física de longo prazo. A manutenção de resíduos culturais sobre a superfície do solo, fornece mucilagens e compostos orgânicos sintetizado pelas raízes, que associados, favorecem a agregação do solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011), contudo é um processo lento e, para apresentar uma agregação semelhante à de áreas coberta com mata nativa, os sistemas de produção devem trabalhar com grande diversidade de espécies (SILVA et al., 2019), como acontece nos plantios rotacionados.

Santos et al. (2016) avaliando atributos físicos de solo em áreas sob diferentes sistemas de uso na região de Manicoré (AM), concluíram que apesar do teor considerável de MOS, o cultivo com milho aumentou o percentual de microagregados instáveis. Isso acontece devido a ruptura da estrutura do solo promovida por implementos agrícolas, que em subsuperfície é prejudicial por conta das menores concentrações de carbono (CALONEGO; ROSOLEM, 2008). A alta concentração de microagregados instáveis, mostra-se prejudicial para o solo, principalmente em ambientes com sistemas de manejo mal dimensionados, pois, é nos microagregados que se encontram grande parte do carbono orgânico do solo, devido a proteção física contra a mineralização (BURAK et al., 2011).

Contudo, quando estáveis, os microagregados mostram-se como uma fonte de reserva de nutrientes para o solo, realizando trocas com a solução do solo através das estruturas conhecidas como porosidade intra-agregados (BURAK et al., 2011). A estabilidade de agregados do solo depende da textura, mineralogia (óxidos e silicatos), teores e tipos de cátions, pH e matéria orgânica (MEURER, 2006). São fatores determinantes da espessura da camada difusa, influenciando na floculação e dispersão de partículas (SPERA, 2008).

A espessura da dupla camada difusa é alterada pela concentração e tipo de eletrólitos como os íons monovalentes de Na e K, cátions com alto grau de hidratação, que formam

complexos de esfera externa e aumentam a distância entre as partículas minerais, dessa forma as forças de atração não se manifestam, elevando a dispersão de partículas de argila no solo (MEURER, 2006). Esse processo afeta a formação de microagregados, e como o Planossolo Háplico em questão apresenta grande quantidade de K nas camadas avaliadas, reduziu a formação de macroagregados úmidos nas camadas mais profundas do solo.

Para o percentual de microagregados secos, o tratamento BI apresentou tendência de crescimento em relação aos demais tratamentos nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, porém sem diferença estatística significativa (Tabela 8). Na camada de 0,20-0,30 m, verificou-se um percentual médio de MacroU = 86,2% no tratamento BD, seguido do tratamento BI com 81,4%. Ação resultante da ação promovida pelo sistema radicular das gramíneas do gênero *Brachiaria*, que por serem agressivas favorecem a manutenção de processos físicos, químicos e microbiológicos nas camadas superficiais do solo. O papel das raízes na formação dos agregados do solo é bastante conhecido na agricultura, principalmente se tratando de gramíneas (SILVA; MIELNICZUK, 1997; BORNICK; LAL, 2005).

Na camada de 0,20-0,30 m, observa-se que houve variação estatística significativa para o DMPAs entre os tratamentos avaliados, com maior valor médio para o tratamento BI = 2,51 mm e menor para o tratamento LA = 1,53. Este fato está relacionado ao aumento do teor de argila em subsuperfície em associação com os compostos orgânicos que atuam no processo de formação de agregados do solo. Contudo, esse resultado não evidencia que o tratamento esteja elevando a estabilidade estrutural do solo de forma significativa, já que para isso acontecer, o DMPAu solo teria que ser superior a 2,44 mm (LIMA et al., 2008).

Uma explicação provável ao aumento do DMPAs em subsuperfície pode estar relacionado aos fatores de formação, como os processos de umedecimento e secagem do solo (MELO et al., 2017), pois são mais representativos em solos com alta concentração de argila. Verifica-se no presente estudo, que os valores médios de DMP foram superiores aos verificados por Pontoni et al. (2012) avaliando a estabilidade de agregados de um solo cultivado sob sistema convencional. Para Marcolan e Anghinoni (2006), os menores diâmetros de agregados encontrados na camada superficial do solo, são esperados, devido a menor estabilidade de agregados em função da exposição ao impacto das gotas da chuva e da mineralização da MOS provocada pelo revolvimento do solo.

No caso do presente estudo, a maior concentração de agregados de maior diâmetro em superfície pode estar relacionada à presença de maior quantidade de agentes cimentantes, que são responsáveis pela estabilização de microagregados do solo (TISDALL; OADES, 1982). Ainda, segundo Pontoni et al. (2012), o aumento do diâmetro médio ponderado de agregados

secos é proporcionalmente maior que o diâmetro médio ponderado de agregados úmidos, o que resulta em valores menores para o índice de estabilidade de agregados (IEA).

Com relação ao índice de estabilidade de agregados (Tabela 8), constata-se que não houve variação estatística significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos nas três camadas de solo avaliadas. Os valores médios variaram de 0,472 a 0,711 na camada de 0,00-0,10 m, de 0,417 a 0,598 na camada de 0,10-0,20 m e de 0,433 a 0,705 na camada de 0,20-0,30 m. Identifica-se que o maior valor médio foi encontrado no tratamento BI = 0,711 na camada de 0,00-0,10 e o menor valor médio no tratamento BS = 0,417 na camada de 0,10-0,20 m.

Comparando-se aos resultados apresentados por Silva et al. (2019) avaliando a estabilidade de agregados na mesma área experimental no ano de 2017, ressalta-se que dois anos após a primeira avaliação, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta favoreceu o aumento do IEA para o tratamento BI na camada de 0,00-0,10 m e para os tratamentos BI, BG e LA na camada de 0,10-0,20 m. O resultado mostrou-se bastante satisfatório, principalmente para os tratamentos BI e LA, com um aumento no IEA da ordem de 0,095 e 0,058, respectivamente.

O aumento no índice de estabilidade de agregados está relacionado ao incremento da MOS durante os ciclos de produção e seus efeitos sobre a melhoria física, química e biológica do solo é bastante conhecido na literatura científica. E como as gramíneas apresentam sistema radicular superficial volumoso, o seu crescimento pode estar contribuindo para a formação e estabilidade de agregados. Como observado por Vezzani e Mielniczuk (2011), para eles a formação de agregados é fortemente influenciada pela ação mecânica das raízes em crescimento e pela ação dos fungos micorrízicos arbusculares (FMA), explicando-se assim, o maior IEA em alguns tratamentos.

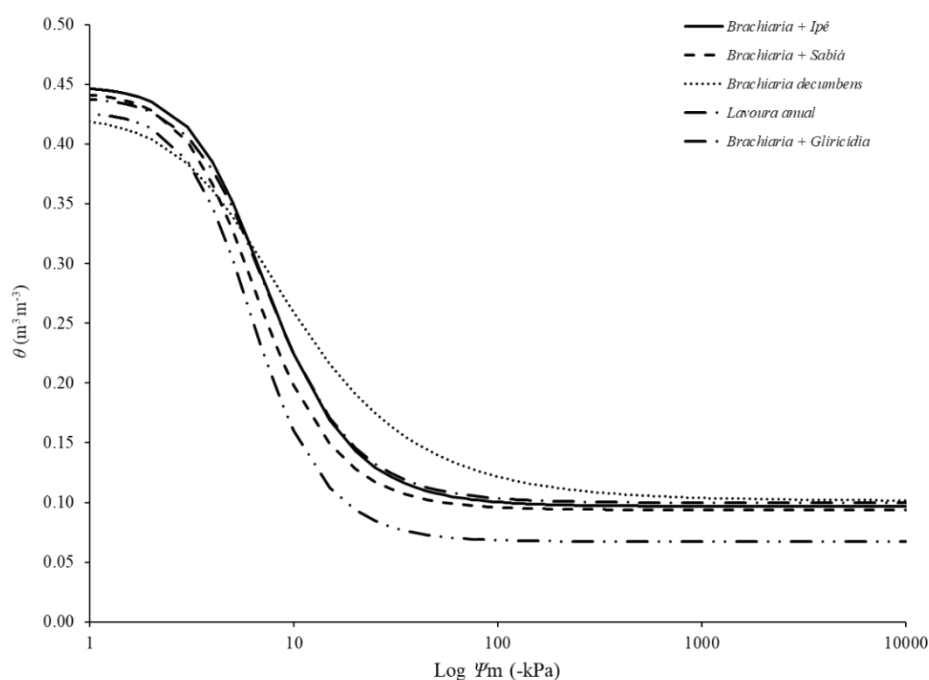
Junqueira et al. (2010) avaliando a estabilidade de agregados em Neossolo sob pastagem e ambiente de mata, verificaram um índice de estabilidade de agregados na ordem de 70%, contudo sem diferença estatística. Porém eles salientam que em solos arenosos um índice dessa magnitude às vezes não é suficiente para conter processos erosivos, por causa da grande quantidade de areia em superfície e pelo baixo conteúdo de MOS. Em sistemas integrados de produção agropecuária esses efeitos são mitigados através da manutenção da cobertura vegetal em superfície.

Fontenele et al. (2009) observaram redução no índice de estabilidade de agregados com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada, quando comparou o sistema de semeadura direta e o cultivo convencional com e sem mobilização do solo em relação à áreas de cerrado recém desmatadas, para eles a redução no IEA está relacionado ao revolvimento

intenso do solo. Contudo, Ramos et al. (2014) afirma que a agitação eletromagnética utilizada na análise de agregados secos pode destruir a estrutura dos agregados recém-formados, ocasionando redução no IEA.

A curva de retenção de água no solo (CRA) para o Planossolo Háplico, correspondente a profundidade de 0,00-0,10 m, encontra-se apresentada na Figura 6.

Figura 6. Curva de retenção de água no solo para um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba. (0,00-0,10 m).



Conforme apresentado na Figura 6, a maioria dos tratamentos apresentaram umidade de saturação ($\theta_s = \Psi_0$) entre 0,40 e 0,45 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, que corresponde a porosidade total do solo na unidade de sucção correspondente a 6 kPa. Verifica-se que as curvas de retenção correspondentes aos tratamentos BI, BS, e LA, apresentam o mesmo comportamento entre as unidades de sucção de -10 e -1500 kPa, com valores de umidade próximo a 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. O mesmo comportamento foi verificado por Portela et al. (2001), avaliando a retenção de água sob diferentes usos no ecossistema tabuleiros costeiros. Segundo eles, esse comportamento está relacionado a maior predominância de microporos nesses tratamentos, refletindo em maior capacidade de retenção.

Entre as unidades de sucção de -10 e -100 kPa, verificou-se que a curva de retenção correspondente ao tratamento BD apresentou um comportamento distinto das demais curvas, demonstrando haver maior volume de água disponível nesse tratamento. No Tratamento BG a

umidade correspondente aos intervalos entre os potenciais matriciais de -10 e -1500 kPa, ficou abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, demonstrando haver sérios problemas de ordem hídrica. A acentuada inclinação das curvas indica um decréscimo abrupto no conteúdo de água no solo, principalmente para os tratamentos (BI, BS, LA, BG). Esse processo geralmente ocorre em solos que apresentam duas classes de solo bem distintas, a primeira formada por macroporos que perde água facilmente em baixas tensões e outra por microporos que é capaz de reter água facilmente à altas tensões (CARDUCCI et al., 2011; CARDUCCI et al., 2013; SILVA et al., 2017).

Os parâmetros de ajuste das curvas de retenção estão apresentados na Tabela 9, verifica-se que não houve variação estatística significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos avaliados. Os valores médios de θ_s variaram de 0,427 a $0,449 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo maior no tratamento BI.

Tabela 9. Parâmetros de ajustes da curva de retenção para um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba. (0,00-0,10 m).

Sistemas	θ_s	θ_R	α	m	n	R^2
	----- $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ -----		--- kPa ---			
0,00-0,10 m						
BI	0,449 a	0,096 a	0,173 a	0,539 a	2,61 a	0,959 a
BG	0,427 a	0,067 a	0,193 a	0,535 a	2,93 a	0,961 a
BS	0,444 a	0,093 a	0,191 a	0,519 a	2,72 a	0,972 a
BD	0,425 a	0,101 a	0,187 a	0,471 a	1,95 a	0,972 a
LA	0,440 a	0,099 a	0,172 a	0,598 a	2,60 a	0,966 a
CV %	5,6	17,1	21,9	28,1	43,1	1,6

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoua anual, CV = Coeficiente de variação, θ_s = Umidade de saturação, θ_R = Umidade residual, α , m e n = Parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção, R^2 = Coeficiente de determinação. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os valores médios de θ_R – umidade residual que corresponde ao potencial matricial de (-1500 kPa), não variou de forma estatística significativa entre os tratamentos avaliados, contudo, observa-se que a maioria dos tratamentos ficaram abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Para Fidalski et al. (2013), o θ_R é um atributo dependente da granulometria do solo, principalmente se em sua composição houver maior concentração de areia grossa. Esse comportamento caracteriza menor capacidade de retenção de água em função da presença de poros de maior diâmetro (macroporos

e bioporos). Comportamento esse verificado na Figura 6, onde foi possível distinguir a curva correspondente ao tratamento BG, das demais curvas avaliadas.

A distinção entre o tratamento BG aos demais pode estar relacionada à entrada de ar ao sistema poroso logo após o processo de drenagem, implicando no processo de drenagem mais rápida do solo representado pelo parâmetro (α) (FIDALSKI et al., 2013). Observa-se que não houve variação estatística significativa para o parâmetro (α) entre os tratamentos avaliados, o que poderia não influenciar no comportamento das curvas através do parâmetro (θ_R). Contudo Fidalski et al. (2013) salientam que a presença de areia grossa pode influenciar nesse comportamento e, se avaliar os dados apresentados na Tabela 5, o tratamento BG apresentou uma concentração de areia superior aos demais tratamentos avaliados.

O parâmetro (α) variou de 0,172 a 0,193 kPa, com uma amplitude de 0,021 kPa entre os tratamentos avaliados. Esses valores diferiram dos valores médios apresentados por Silva et al. (2017), avaliando a curva de retenção de água no solo em ambiente de mata, encontrando-se (α) = 3,89 e (θ_R) = 0,33 g kg⁻¹ de água, afirmando que a maior retenção de água está ligada aos valores médios elevados de (α), porém para solos com elevado conteúdo de argila.

Apesar da similaridade entre os coeficientes (Tabela 9), o valor de (n) foi menor no tratamento BD, caracterizando uma maior retenção de água entre os potenciais Ψ -10 e -100 kPa. Esse resultado evidencia uma maior porosidade total no tratamento BD, com ampla distribuição no tamanho de poros (SILVA; AZEVEDO, 2002), destacando-se os microporos por atuarem diretamente na retenção de água no solo com potenciais mais elevados. Comportamento contrário foi verificado no tratamento BG, verificando-se um valor (n) superior aos demais tratamentos avaliados, com 2,93. Entende-se então, que no tratamento BG há uma maior predominância e distribuição de poros de maior diâmetro (> 0,03 mm), que correspondem aos macroporos e bioporos.

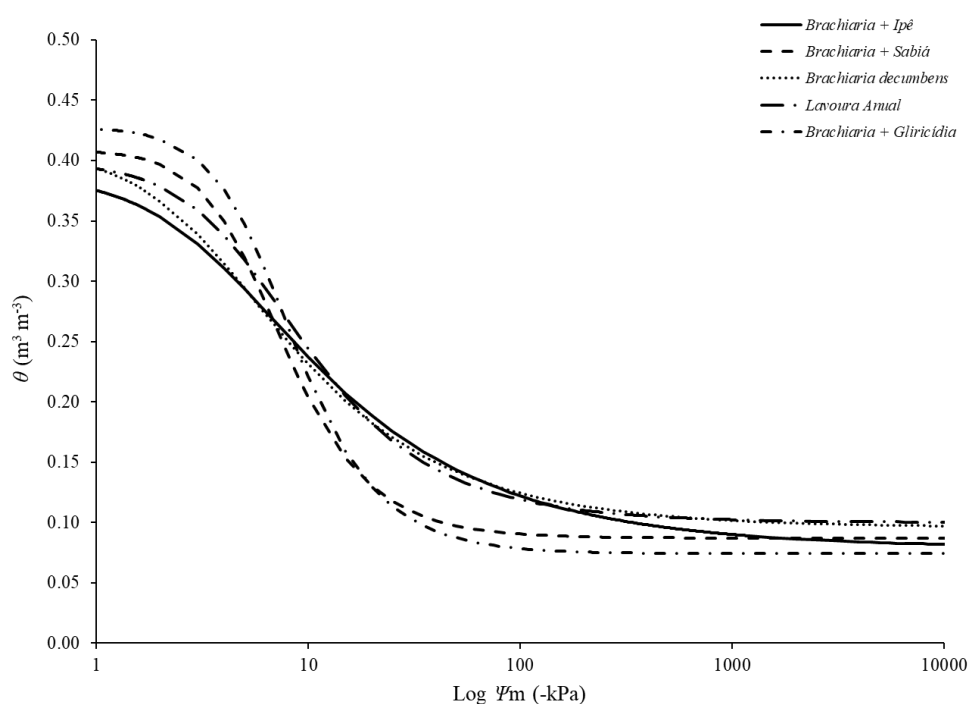
Para o parâmetro θ_R , verifica-se que não houve variação estatística significativa entre os tratamentos avaliados (Tabela 9), contudo foi menor no tratamento BG, $\theta_R = 0,067 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Para Portela (2001), valores baixos de θ_R caracterizam menor porosidade total do solo, com predominância de macroporos e posterior menor capacidade de água disponível às plantas. O mesmo comportamento foi verificado por Machado et al. (2008) avaliando inter-relações entre propriedades físicas de solo e os componentes da curva de retenção, para ele os valores baixos de θ_R são influenciados pela (ρ), que podem comprometer a estrutura do solo, reduzindo a distribuição espacial e temporal dos poros no solo.

Quanto aos coeficientes de determinação (R^2), verifica-se que não houve variação estatística entre os tratamentos avaliados, com variação de (0,959 a 0,972). É um resultado

bastante satisfatório, e demonstra a eficácia da utilização da equação de Van Genuchten (1980) na obtenção das curvas de retenção de água no solo para o Planossolo avaliado. O modelo de Van Gennuchten é amplamente utilizado na obtenção das curvas de retenção, por se ajustar com melhor qualidade à curva experimental para uma ampla variedade de solos (XIANG-WEI et al., 2010).

As curvas de retenção de água para a camada de solo avaliada na profundidade de 0,10-0,20 m, encontra-se apresentada na figura 7 e os parâmetros de ajuste na Tabela 10. Não houve variação estatística significativa para os parâmetros de ajustes das curvas entre os tratamentos avaliados, contudo observa-se que o comportamento das curvas na camada de 0,10-0,20 m, foi diferente do comportamento das curvas na camada superficial de 0,00-0,10 m.

Figura 7. Curva de retenção de água no solo para um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba. (0,10-0,20 m).



Verifica-se uma queda acentuada na umidade do solo com o aumento da tensão aplicada, comportamento esse apresentado pelas curvas correspondentes aos tratamentos BS e BG, provavelmente em função da predominância de macroporos. As curvas correspondentes aos tratamentos BI, BD e LA, apresentaram um comportamento distinto das demais curvas analisadas, com maior retenção de água entre os potenciais matriciais de -10 e -100 kPa. Assim como na camada de 0,00-0,10 m, os tratamentos que apresentaram maior retenção de água

foram o BD e LA, ocasionada pelos seguintes fatores: maior presença da fração argila, microporosidade acentuada e elevação nos valores de (ρ).

A rápida perda de água apresentada pelos tratamentos BS e BG é característica de solos arenosos (FIDALSKI et al., 2013), principalmente os que apresentam areia grossa e muito grossa, em função da predominância de poros com diâmetro maior que 0,02 mm. Em relação à influência da densidade no comportamento da curva de retenção, Machado et al. (2008) salienta que o aumento de (ρ), promove modificações na distribuição de poros no solo, principalmente naqueles poros que retêm água em Ψ_m maiores que -100 kPa, evidenciado pela redução nos valores de θ_s e (n). A curva de retenção de água no solo (CRA) apresenta duas características importantes relacionadas ao funcionamento do solo, a primeira que corresponde a dependência estrutural do solo, abaixo do Ψ 10 kPa, geralmente formada por bioporos macroporos, mesoporos e a segunda está relacionada à dependência textural do solo $\Psi_m > -10$ kPa, geralmente composta por microporos e criptoporos (MOTA et al., 2017).

Observa-se na Tabela 10, que os menores valores de (n) corresponderam aos tratamentos BI = 1,59, BD = 1,70 e LA = 1,93, evidenciando a forte retenção de água entre os Ψ correspondentes a -10, -100 e acima de -1000 kPa. A elevada capacidade de retenção de água nesses tratamentos, não evidencia que o solo possua uma capacidade de água disponível significativa para as plantas, já que a água prontamente disponível, geralmente se encontra armazenada nos mesoporos.

Tabela 10. Parâmetros de ajustes da curva de retenção para um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba. (0,10-0,20 m).

Sistemas	θ_s	θ_R	α	m	n	R^2
	----- $m^3 m^{-3}$ -----		--- kPa ---		-----	
0,00-0,10 m						
BI	0,346 a	0,079 a	0,277 a	0,356 a	1,59 a	0,967 a
BG	0,428 a	0,073 a	0,156 a	0,547 a	2,60 a	0,952 a
BS	0,409 a	0,087 a	0,174 a	0,529 a	2,60 a	0,966 a
BD	0,409 a	0,095 a	0,303 a	0,391 a	1,70 a	0,963 a
LA	0,399 a	0,100 a	0,193 a	0,475 a	1,93 a	0,969 a
CV %	5,4	17,2	51,0	24,4	37,5	1,6

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoua anual, CV = Coeficiente de variação, θ_s = Umidade de saturação, θ_R = Umidade residual, α , m e n = Parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção, R^2 = Coeficiente de determinação. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os parâmetros da curva de retenção apresentam comportamentos bem distintos e correlacionam-se com algumas características físicas do solo, imprescindíveis para o seu comportamento. A exemplo, o parâmetro θ_S correlaciona-se com a estrutura do solo, portanto mais sensível as práticas de manejo do solo; o θ_R é um parâmetro mais estático, geralmente relacionado a textura do solo e sua variação dentro de uma mesma área está ligada aos fatores de formação do solo (intemperismo), movimento da água e solutos e outras ações de longo prazo (MOTA et al., 2017). A alta variabilidade do θ_R indica que a área apresente uma certa heterogeneidade quanto à distribuição de partículas (areia, silte e argila) no solo. E apesar de não ter ocorrido variação estatística significativa entre os parâmetros avaliados, tanto para a camada de 0,00-0,10 (Tabela 9) e 0,10-0,20 m (Tabela 2), observa-se uma amplitude para o θ_R de 0,034 para a camada de 0,00-0,10 e 0,027 para a camada de 0,10-0,20 m, demonstrando maior homogeneidade para a textura do solo com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada.

E se traçar uma análise de correlação entre o parâmetro θ_R e a análise textural do solo apresentada na Tabela (5), observa-se aumento nos valores desse parâmetro com a redução nos teores de areia do solo e aumento nos teores de argila. A argila apresenta maior superfície específica e auxilia na microporosidade do solo, seja intra ou inter-agregados, ocasionado maior retenção de água no solo e possível elevação no valor de θ_R .

Comparando-se o comportamento das curvas de retenção apresentadas pelos tratamentos BI, BD e LA, nas duas profundidades de solo avaliadas (Figura 5 e 6), respectivamente, pode-se afirmar que acima do potencial matricial correspondente a Ψ 10 kPa, as curvas tiveram grande influência do gradiente textural do solo, principalmente da fração argila, por ser mais predominante nos tratamentos anteriormente citados. A mudança de gradiente textural com o aumento de profundidade do solo, muda toda a dinâmica de distribuição de poros do solo, com reflexos no comportamento da curva de retenção de água no solo. De modo geral, quanto maior for a inclinação da curva de retenção de água no solo, maior tende a ser a diversidade e distribuição de tamanho de poros (SUZUKI et al., 2014).

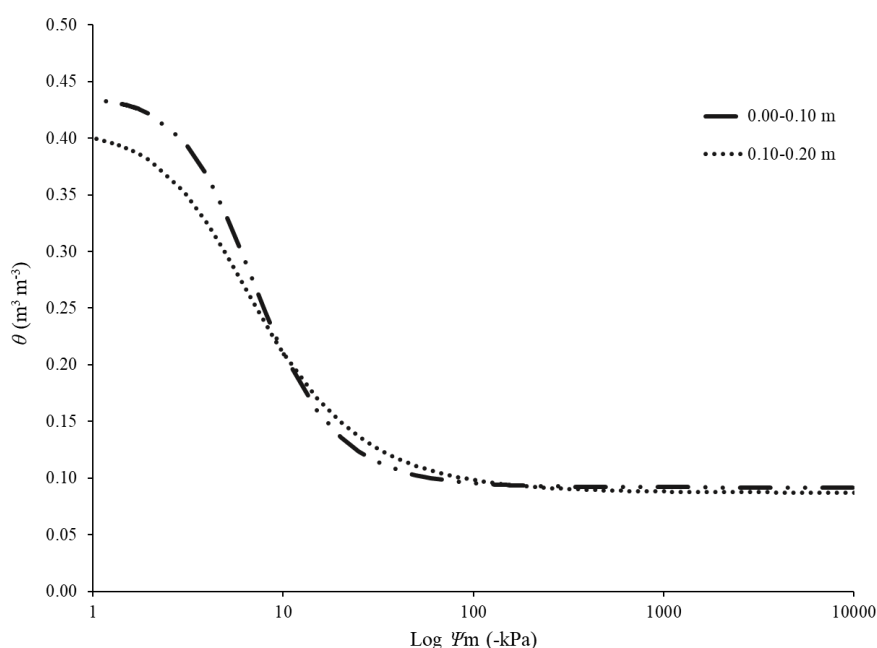
Resultado esse pode ser observado através da inclinação apresentada pelas curvas de retenção correspondentes aos tratamentos BG e BS (Figuras 5 e 6) nas duas camadas de solo avaliadas, demonstrando haver uma maior distribuição de poros no solo, sob influência da estrutura do solo, que é representada pela menor capacidade de retenção de água, em relação as curvas correspondentes aos demais tratamentos avaliados.

Na Figura 8, pode-se observar a curva de retenção de água no solo para as camadas de solo correspondentes as profundidades de 0,00-0,10 m. A acentuada inclinação das curvas com

o aumento do potencial matricial aplicado demonstra haver duas influências bem distintas sobre a retenção de água no solo. Uma de ordem estrutural com uma leve amplitude entre as curvas até a tensão de -10 kPa e a outra de ordem estrutural, demonstrada pela baixa variação de amplitude apresentada entre as curvas, quando as amostras foram submetidas à tensão de -100 kPa.

O coeficiente de determinação (R^2) explicou o ajuste das curvas de retenção para a camada de 0,10-0,20 m de forma bastante satisfatória, variando de 95,2 a 96,9%, com $CV = 1,6$. Esse resultado evidencia a acurácia da utilização da equação de Van Genuchten (1980) para os ajustes dos dados de umidade do solo para o Planossolo Háplico. Para Suzuki et al. (2014), nas maiores tensões e com o aumento de profundidade, a amplitude da variação entre as curvas de retenção diminui, associada ao fato de que para altos teores de água, a curva característica depende do arranjo e dimensão dos poros, enquanto para os baixos teores de água, o potencial matricial depende mais da textura e mineralogia do solo. Explicando assim, a baixa amplitude apresentada pelas curvas de retenção de água com o aumento da tensão aplicada no presente estudo.

Figura 8. Curva de retenção de água no solo para um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba. Camadas (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m).



Os parâmetros de ajustes correspondentes as curvas de retenção das camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m encontram-se na Tabela 11. Foram apresentados os valores médios sem análise estatística dos resultados. Os parâmetros θ_s e θ_R foram superiores na camada de 0,00-0,10 m, indicando haver predominância da porosidade total, demonstrada pelo $\theta_s = 0,437 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em relação ao θ_s da camada de 0,10-0,20 m, uma variação de $0,039 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no volume de água armazenado.

Tabela 11. Parâmetros de ajustes da curva de retenção para um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba. Camadas médias de (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m).

Camada	θ_s	θ_R	α	m	n	R ²
(m)	---- $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ----		--- kPa ---	-----		
0,00-0,10	0,437	0,091	0,1832	0,532	2,562	0,966
0,10-0,20	0,398	0,086	0,2757	0,459	2,084	0,963

θ_s = Umidade de saturação, θ_R = Umidade residual, α , m e n = Parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção, R² = Coeficiente de determinação.

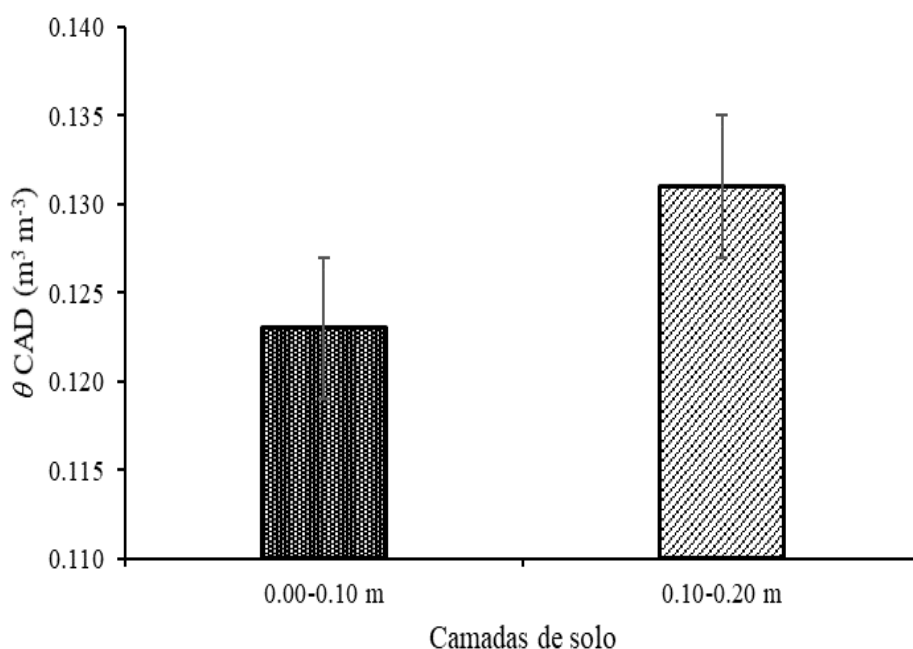
Entre os potenciais matriciais correspondentes as tensões de -10 e -100 kPa, verifica-se que a retenção de água na camada de 0,10-0,20 m, foi superior a umidade retida da camada de 0,00-0,10 m, fato este relacionado à predominância de microporos e elevação no teor de argila do solo. O parâmetro (n) foi menor em subsuperfície, com um valor médio de 2,084, confirmando a predominância de poros de diâmetros menores. Dois fatores podem ocasionar o aumento na distribuição dos microporos em subsuperfície, a redução nos teores de areia grossa e o aumento de densidade do solo.

Nesse caso, observa-se o aumento na densidade do solo com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada (Tabela 6), ocasionando influência no comportamento da curva de retenção entre os potenciais Ψ_m de -10 e -100 kPa e a baixa amplitude entre os Ψ_m de -100 e -1500 kPa. Porém, quando se fala de disponibilidade de água, a camada de 0,00-0,10 foi inferior a camada de 0,10-0,20 m. O mesmo foi observado por Carducci et al. (2015) avaliando a retenção de água no solo sob manejos conservacionistas, para eles a predominância de poros com diâmetro entre 1 e 0,2 mm ($> 200 \mu\text{m}$) aumentam a disponibilidade de água para as plantas, fato esse que pode ser comprovado pela inclinação bem definida das curvas de retenção. Acima do potencial matricial correspondente a tensão de -1500 kPa, a água passa a ser armazenada

nos crioporos – estruturas com diâmetro menos que 0,0002 mm, de grande importância para as plantas (KLEIN, 1998).

Já para a camada de 0,00-0,10 m, a redução na capacidade de água disponível as plantas (Figura 8) pode estar relacionada a presença de macroporos e ao gradiente textural com predominância da fração areia, que aumenta a capacidade de aeração do solo e reduz a capacidade do mesmo em armazenar água. Para Klein e Libardi (2002) a maior retenção de água na camada superficial, particularmente nos potenciais mais negativos, se deve ao maior número de mesoporos finos (2,9-0,6 μm) e microporos ($< 0,6 \mu\text{m}$), que são responsáveis pela retenção de água com alta energia, nos potenciais matriciais mais elevados do solo.

Figura 9. Capacidade de água disponível Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba. Camadas (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m).



É nítida a variação entre a capacidade de água disponível para as duas camadas de solo avaliadas (Figura 9), com 0,123 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 0,00-0,10 m e 0,131 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 0,10-0,20 m. O aumento de densidade do solo com a profundidade pode ter contribuído na alteração dos macroporos, transformando-os em mesoporos e microporos, ocasionando estreitamento da curva de retenção, com posterior aumento no volume de água armazenado (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2011).

Em superfície, geralmente há uma maior heterogeneidade na distribuição e diâmetro das classes de poros, ocasionadas principalmente pelas práticas de manejo do solo. O revolvimento

intenso através de implementos agrícolas, ocasiona o rompimento dos agregados do solo, promovendo aumento da microporosidade e consequentemente o fenômeno da capilaridade (SERAFIM et al., 2011), delimitando o comportamento das curvas de retenção e a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água as plantas.

Os valores médios para os atributos capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), água disponível (θ_{AD}), capacidade de água disponível (CAD), capacidade de campo relativa (CCr) e índice “S”, encontram-se apresentados na Tabela 12. Observa-se que não houve variação estatística significativa entre os tratamentos ao nível ($p < 0,05$) para as duas camadas de solo avaliadas. Os valores médios variaram de 0,209 a 0,259 para (θ_{CC}), 0,078 a 0,107 para o (θ_{PMP}), 0,108 a 0,153 para a (θ_{AD}), de 1,44 a 2,11 para a CAD, de 0,420 a 0,541 para a CCr e 0,091 a 2,21 para o índice “S”.

Tabela 12. Capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível e índice “S” em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Sistemas	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{AD}	CAD	CCr	S
	----- m ³ m ⁻³ -----	----- m ³ m ⁻³ -----	----- m ³ m ⁻³ -----	--- mm ---	-----	-----
0,00-0,10 m						
BI	0,234 a	0,102 a	0,132 a	1,81 a	0,487 a	0,199 a
BG	0,208 a	0,100 a	0,108 a	1,44 a	0,420 a	0,215 a
BS	0,214 a	0,099 a	0,114 a	1,56 a	0,447 a	0,221 a
BD	0,209 a	0,078 a	0,130 a	1,80 a	0,438 a	0,122 a
LA	0,239 a	0,107 a	0,132 a	1,73 a	0,474 a	0,107 a
CV %	11,2	15,8	12,9	13,8	12,7	65,2
0,10-0,20 m						
BI	0,234 a	0,097 a	0,137 a	1,94 a	0,507 a	0,078 a
BG	0,214 a	0,102 a	0,112 a	1,57 a	0,458 a	0,188 a
BS	0,209 a	0,090 a	0,119 a	1,67 a	0,448 a	0,178 a
BD	0,215 a	0,076 a	0,138 a	1,91 a	0,452 a	0,091 a
LA	0,259 a	0,105 a	0,153 a	2,11 a	0,541 a	0,107 a
CV %	9,5	16,2	11,7	13,3	11,6	53,3

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoura anual, CV = Coeficiente de variação, θ_{CC} = Capacidade de campo, θ_{PMP} = Ponto de murcha permanente, θ_{AD} = Água disponível, CAD = Capacidade de água disponível, CCr = Capacidade de campo relativa, S = Índice “S”. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A umidade na θ_{CC} foi superior no tratamento LA nas duas camadas de solo avaliadas, 0,239 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0,00-0,10 e 0,259 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0,10-0,20 m. O único tratamento que apresentou redução nos valores médios para o conteúdo de água na capacidade de campo foi BS, de 0,214 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0,00-0,10 para 0,209 na camada de 0,10-0,20 m, uma redução de 0,005 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, um valor não muito significativo, mas que pode fazer diferença na disponibilidade de água para as plantas (Tabela 12). O mesmo comportamento foi verificado por Nascimento et al. (2019) avaliando atributos físicos de solo sob sistemas integrados de produção, de longa duração.

Com exceção do tratamento BG, observa-se que houve redução na umidade correspondente ao θ_{PMP} com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada, resultados esses que refletiram em um maior conteúdo de água disponível para as plantas. A elevação de umidade correspondente ao ponto de murcha permanente na camada de 0,00-0,10 m está relacionada ao aumento no gradiente textural, com maiores concentrações de argila. O θ_{PMP} é uma variável hídrica dependente da textura do solo, e seus valores são elevados na presença de argila, em função da maior distribuição de poros relacionados a retenção, como os microporos e criptoporos.

Os valores médios de água disponível aumentaram com elevação na camada de solo avaliada, com destaque para o tratamento LA na camada de 0,00-0,10 m com 0,153 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Como salientado por Serafim et al. (2011), o revolvimento do solo nas áreas de lavoura, ocasiona o rompimento dos agregados do solo, promovendo aumento de microporosidade, principalmente intra-agregados, elevando a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água para as plantas. Em alguns casos, o baixo conteúdo de água disponível às plantas está relacionado ao elevado conteúdo de água no θ_{PMP} , que se estiver fortemente retido, pode comprometer a absorção pelo sistema radicular dos vegetais (SILVA et al., 2017).

Se comparado aos dados apresentados por Silva et al. (2009), avaliando a disponibilidade de água em Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta após dois anos de instalação, verifica-se que houve redução dos valores médios para todos os atributos avaliados, inclusive para o θ_{PMP} e θ_{AD} . Mota et al. (2017) ressaltam que os solos agrícolas apresentam heterogeneidade de atributos no tempo e no espaço, podendo assim influenciar nos valores médios para os atributos físico-hídricos do solo ao longo do tempo.

O pastejo animal, realizado antes das coletas de solo para realização desse experimento podem ter contribuído para a redução na macroporosidade do solo, reduzindo assim a taxa de infiltração de água no solo. Uma problemática relacionada ao aumento da Ma é a predominância

de microporos, que apesar da importância para o armazenamento de água no solo, os microporos podem restringir a penetração das raízes das plantas em função de seu reduzido diâmetro (MEDEIROS et al., 2005), ocasionando reflexos negativos nos índices de produtividade, principalmente na parte aérea. Com relação a θ_{AD} , Hillel et al. (1977) propôs uma faixa de valores que podem ser utilizadas como indicadores de qualidade físico-hídrica do solo, relacionada a disponibilidade de água.

Analisando os dados apresentados na Tabela 13, pode-se afirmar que com exceção do LA na camada de 0,00-0,10 m, os demais tratamentos estão enquadrados na faixa de umidade limitante, que corresponde a $0,10 < \theta_{AD} \leq 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Valores médios próximos ao limite crítico foram observados nos tratamentos BG e BS nas duas camadas de solo avaliadas, afirmando-se então possível restrição hídrica. Para Reynolds et al. (2007), quando a umidade correspondente θ_{AD} é menor que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, ele passa a ser caracterizado como seco ou potencialmente seco, pois não pode satisfazer as necessidades dos vegetais por água, estando ela fortemente retida nas partículas de argila do solo.

Nos demais tratamentos a elevada concentração de matéria orgânica proveniente das gramíneas deve ter favorecido o armazenamento e disponibilidade de água as plantas, já que a MOS apresenta uma superfície específica com elevada capacidade de retenção de água, ocasionando a formação de filmes ao redor das partículas, resultando em maiores volumes de água armazenado (HILLEL, 1980; MEUR et al., 2000; VASCONCELOS et al., 2010). A baixa capacidade de água disponível nos tratamentos BG e BS pode ser observada através dos comportamentos das curvas de retenção apresentadas nas Figuras (5 e 6), verificando-se elevada perda de água com a aplicação de potenciais matriciais elevados.

Magalhães et al. (2018) avaliando atributos físico-hídricos do solo sob sistema integrado de produção agropecuária, utilizando Paricá como componente florestal, verificaram valores baixos de água disponível para a camada de 0,00-0,10 m, segundo eles, o componente florestal ainda não surtiu efeito significativo na estrutura do solo, de forma que proporcionasse maior capacidade de retenção e disponibilidade de água. Nesse estudo verifica-se que o componente florestal não exerceu influência sobre a capacidade de armazenamento de água no solo na camada de 0,00-0,10 se comparado aos demais tratamentos avaliados.

Comportamento diferente foi verificado por Magalhães et al. (2018), avaliando a retenção de água como indicador de qualidade física do solo sob sistema integrado de produção agropecuária no estado do Mato Grosso, verificaram que, embora o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta fosse semelhante entre as áreas avaliadas, o arranjo das espécies

florestais surtiu efeito positivo na retenção de disponibilidade de água às plantas, principalmente nos potenciais equivalentes as tensões Ψ_m -10 e -1500 kPa.

A redução na incidência direta de raios solares sobre o solo através das copas das árvores, afeta o desenvolvimento da *Brachiaria*, proporcionando uma menor proteção física ao solo (MAGALHÃES et al., 2018). Nesse sentido, pode comprometer a infiltração e o armazenamento de água, por causa dos problemas relacionados ao selamento da camada superficial. Barros et al. (2018) verificaram que o conteúdo de água disponível foi menor no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta em relação aos sistemas lavoura-pecuária e mata nativa. Para eles, esse comportamento está relacionado a maior distribuição de poros, nos sistemas lavoura-pecuária e mata nativa.

Em ambiente de mata, geralmente a retenção e disponibilidade de água está relacionada aos teores de MOS, diferente dos sistemas convencionais de produção, onde a (ρ) é mais eficiente na retenção de água em comparação a MOS (ALVES et al., 2016). Esse efeito favoreceu melhoria na disponibilidade de água as plantas, principalmente na camada de 0,10-0,20 m, onde se observou maior microporosidade e densidade do solo. E como a retenção e disponibilidade de água no solo depende da quantidade e natureza da fração argila (CENTURION; ANDRIOLI, 2000), pode-se afirmar que a distribuição de partículas na profundidade de 0,10-0,20 m, com predominância da fração argila, foi eficiente na melhoria da disponibilidade de água para as plantas.

A capacidade de água disponível, não foi significativa entre os tratamentos avaliados, contudo foi superior no tratamento LA na camada de 0,10-0,20 m, com 2,11 mm de lâmina de água armazenada, correspondendo a 2,11 litros de água por m² de superfície de solo, aproximadamente 21.100 litros de água por hectare. A escarificação do solo e a distribuição do sistema radicular das gramíneas (milho e *Brachiaria*) favorece a infiltração de água no solo e o armazenamento a longo prazo. Contudo esses valores foram inferiores aos encontrados por Assis et al. (2019) avaliando a capacidade de água disponível em pastagens degradadas e sistemas de integração, com 8,7 mm para a área de pastagem e 10,5 para a área sob sistema de integração. Para eles a menor capacidade de armazenamento de água na pastagem degradada está relacionada a (ρ), ocasionada pelo pisoteio animal.

Já nos sistemas integrados de produção agropecuária, o aumento de densidade pode ser revertido no momento de preparo do solo, antes do plantio, favorecendo o armazenamento de água no solo em função da formação de microagregados (LOSS et al., 2014), promovendo melhorias na disponibilidade de água as plantas. No presente trabalho a CAD foi superior nos tratamentos BI e BD na camada de 0,00-0,10 e LA, BI e BD na camada de 0,10-0,20 m.

A capacidade de campo relativa (CCr) não foi significativa entre os tratamentos avaliados (Tabela 13), variando de 0,420 a 0,487 na camada de 0,00-0,10 e de 0,448 a 0,541 na camada de 0,10-0,20 m. Os maiores valores médios foram verificados no tratamento BI na camada de 0,00-0,10 m e no tratamento LA na camada de 0,10-0,20 m. Salienta-se que todos os valores de CCr ficaram abaixo da faixa limite considerada ótima, que segundo Olness et al. (1998) é de 0,6 a 0,7.

Quando os valores médios de CCr estão abaixo de 0,6, presume-se que o solo está sob estresse hídrico, com baixo conteúdo de água; acima de 0,7 – o solo encontra-se sob excesso de saturação, e começa a apresentar problemas relacionados a baixa difusão de gases (baixa capacidade de aeração (OLNESS et al., 1998). A capacidade de campo relativa é uma variável imprescindível para avaliação de qualidade física do solo, pois representa o balanço ótimo na zona rizosférica entre a capacidade de água disponível no ponto de saturação ($\Psi = \theta_0$) e a capacidade de aeração do solo (REYNOLDS et al., 2007).

Salienta-se então, que independente da camada de solo avaliada, todos os tratamentos estão passando por problemas físicos relacionados ao baixo conteúdo de água no solo (Tabela 13), problemas esse confirmado através da análise de dados provenientes da curva de retenção de água no solo, capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Essas informações evidenciam o que já é conhecido na literatura sobre os problemas hídricos relacionados aos Planossolos (SOUZA et al., 2013), que além de apresentarem baixa capacidade de infiltração de água (subsuperfície) – também apresentam sérios problemas relacionados a capacidade de armazenamento de água no solo.

Os valores encontrados por esse estudo foram menores aos verificados por Nascimento et al. (2019), avaliando a CCr em Latossolo Vermelho e Cambissolo Háplico de textura franco-arenosa sob sistema de integração lavoura-pecuária de longa duração no estado do Paraná. Malheiro (2017) encontrou valores médios para CCr variando de 0,56 a 0,70 em solo arenoso sob sistema de integração, contudo os valores foram reduzindo com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada. Para eles esse resultado é devido ao menor teor de COT presente na camada subsuperficial, uma vez que o COT está intimamente relacionado com a estrutura do solo e a capacidade de adsorver água, principalmente em solos arenosos.

Além dos problemas relacionados a aeração e retenção de água, a CCr, quando acima ou abaixo do limite crítico, pode comprometer a ação dos microrganismos do solo, por causa das condições físicas consideradas inadequadas (REYNOLDS et al., 2007). Apesar de ser caracterizado como um índice de grande importância para avaliação da qualidade física do solo,

percebe-se que na literatura brasileira, há carência de informações à cerca da temática, principalmente relacionados a Planossolo sob sistemas integrados de produção agropecuária.

Verifica-se também, que as práticas de manejo ligadas ao tratamento LA não estão comprometendo a qualidade física do solo, informação essa confirmada através da análise dos dados de CCr , θ_{CC} , θ_{PMP} e θ_{AD} (Tabela 12).

Quanto ao índice “S” verifica-se que não houve variação estatística significativa entre os tratamentos avaliados, contudo todos os valores permaneceram acima do limite utilizado como crítico para o solo, que segundo Dexter (2004) $S \geq 0,035$ é considerado de boa qualidade e $< 0,020$, representa um solo pobre e degradado. Verifica-se na Tabela 13, que todos os tratamentos estão na faixa de boa qualidade, com o menor valor médio $S = 0,078$ encontrado no tratamento BI na camada de 0,10-0,20 m. Valores próximos aos encontrados nesse estudo foram observados por Malheiro (2016) em solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta.

Contudo, ele explica que valores distantes ao considerado adequado $S \geq 0,035$, são considerados inconsistentes e imprecisos, pois se assemelham a solos argilosos bem estruturados e solos sob mata nativa, $S = 0,70$. Para Maia (2011) o valor do índice S é superior quando a umidade do solo usada no ajusta da curva de retenção de água proposta por Van Genuchten (1980) é expressa na forma volumétrica, quando comparada a gravimétrica. Explicando assim, os valores elevados encontrados no presente estudo. A maior redução foi verificada no tratamento BI, saindo de 0,199 na camada de 0,00-0,10 m para 0,078 na camada de 0,10-0,20 m, uma redução de 0,121.

Essa redução pode estar relacionada ao aumento de densidade do solo com a profundidade da camada avaliada e redução na macroporosidade do solo e no teor de matéria orgânica em superfície, atributos físicos importantes na formação e estruturação do solo. Maiores valores de S (maior inclinação) indicam melhor distribuição do tamanho de poros, condizente com condições estruturais que estabelecem um adequado funcionamento físico do solo. Assim, fatores relacionados com o solo (textura) e com o manejo (matéria orgânica e estrutura), que influenciam a distribuição do tamanho de poros, refletem em mudanças nos valores de S e, portanto, na qualidade física do solo (DEXTER et al., 2004; MAIA, 2011).

Silva et al. (2017) encontraram valores de S variando de 0,085 a 0,093 em solo sob diferentes sistemas de manejo, foram valores altos, contudo não apresentaram sensibilidade no diagnóstico das modificações estruturais provenientes do uso e manejo do solo. Van Lier (2012; 2014), salienta que a utilização do índice S como indicador de qualidade do solo requer alguns cuidados, principalmente quando se comparam valores obtidos em solos tropicais aos

determinados por Dexter (2004) em solos da Polônia. Ainda segundo Van Lier (2014), o índice S é um parâmetro estático e sua utilização como indicador de qualidade física do solo deve ser considerada, porém com suporte de outros indicadores físicos, principalmente os relacionados a dinâmica.

Maia (2011) avaliando o índice S como indicador de qualidade do solo encontrou valores variando de 0,167 a 0,652. Para ele, esses valores altos estão relacionados à unidade utilizada para o cálculo de umidade do solo, ao nível de restrição utilizado no ajuste de retenção ($m = 1 - 1/n$) e aos valores de densidade do solo, pois dependendo do valor de densidade do solo, o índice S pode variar conforme a unidade utilizada para o cálculo de umidade.

O índice S por sua vez, está relacionado com a distribuição no diâmetro de poros de maior frequência (bimodalidade), bem como está associado a menor restrição física para o crescimento das plantas, seja por restrição mecânica, aeração ou por fatores que atuam na retenção de água no solo (DEXTER, 2004; OLIVEIRA et al., 2015). Valores de S elevados, equivalem a maior inclinação da curva de retenção de água no solo, indicando melhor distribuição de poros e maior quantidade de poros com maior diâmetro (SILVA et al., 2012).

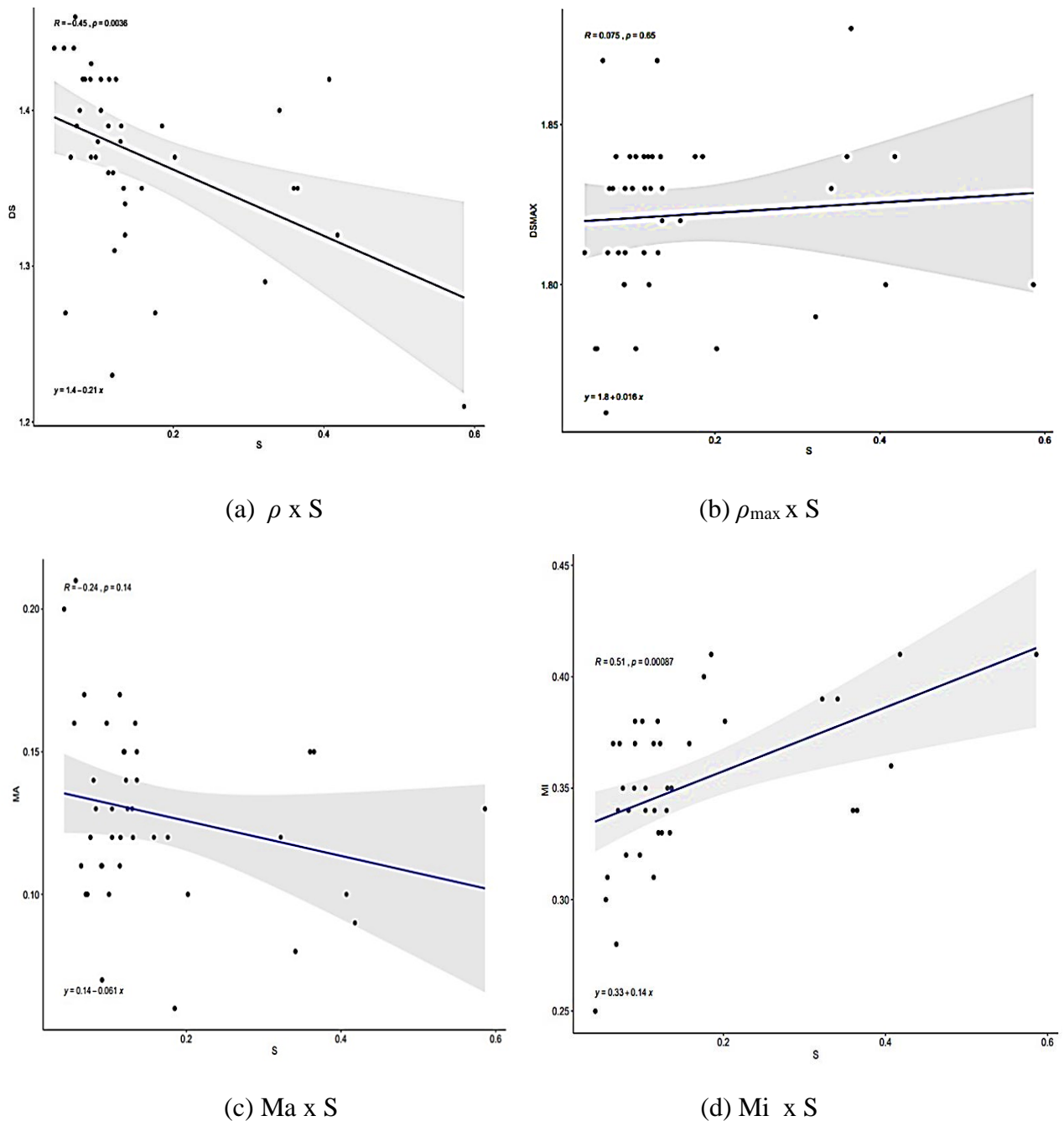
Carducci et al. (2015) avaliando a retenção de água no solo sob sistema conservacionista de manejo sob diferentes doses de gesso, encontraram valores de S variando de 0,06 a 0,13 entre as camadas de 0,00 até 1,50 m. Nesse caso, o índice foi influenciado pelos valores de $\rho > 1,0 \text{ g cm}^{-3}$, $\theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e demais atributos físicos de solo, a exemplo do teor de argila, estrutura, conteúdo de matéria orgânica e distribuição de diâmetro de poros (OLIVEIRA et al. 2004; CARDUCCI et al., 2015).

Verifica-se nas Figuras 6 e 7, que a maior inclinação das curvas de retenção de água no solo correspondeu aos tratamentos BS e BG nas camadas de 0,00-0,10 m e de 0,10-0,20 m, corroborando com a afirmativa apresentada por Silva et al. (2012), de que quanto maior o índice S, maior a bimodalidade e a inclinação na CRA. No presente estudo, verificou-se que os maiores valores de índice S corresponderam aos tratamentos BS e BG. Assis et al. (2015) avaliando atributos físicos de solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta encontraram valores de S variando de 0,025 a 0,61, sendo maior na área sob iLPF e menor nas áreas com pastagem degradada, demonstrando a sensibilidade do índice na predição da qualidade física do solo.

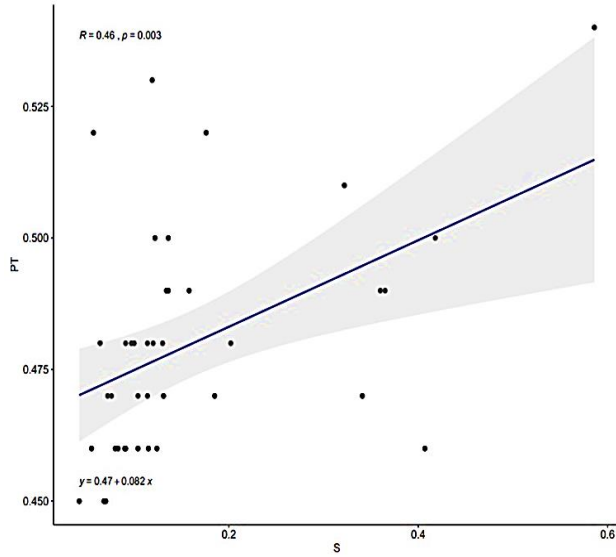
Ainda segundo Assis et al. (2015), os valores menores de densidade e maiores de porosidade total no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, favoreceu o aumento dos valores médios de S, comprovando a eficácia desse sistema de produção na recuperação da qualidade física do solo. O mesmo foi verificado por Assis et al. (2019), evidenciando a

correlação positiva entre o índice S e os atributos CAS, α e CAD. Falando de correlação entre atributos físicos de solo e índice S, na Figura 10, encontram-se apresentados a correlação linear entre os atributos físicos de solo e o índice S, para o Planossolo sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

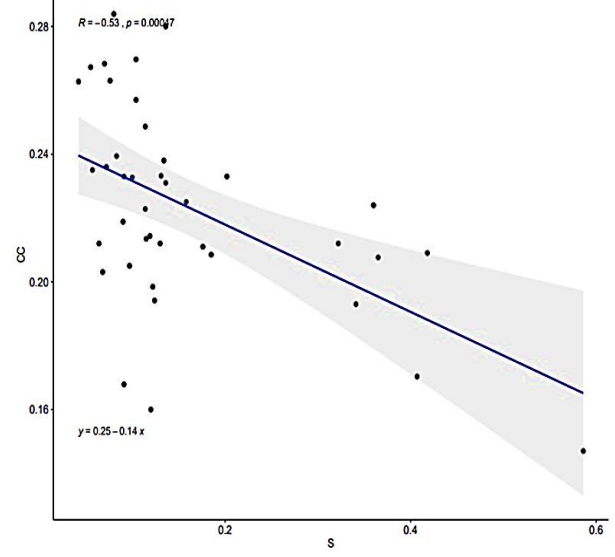
Figura 10. Correlação linear entre atributos físicos de solo e índice “S” para Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.



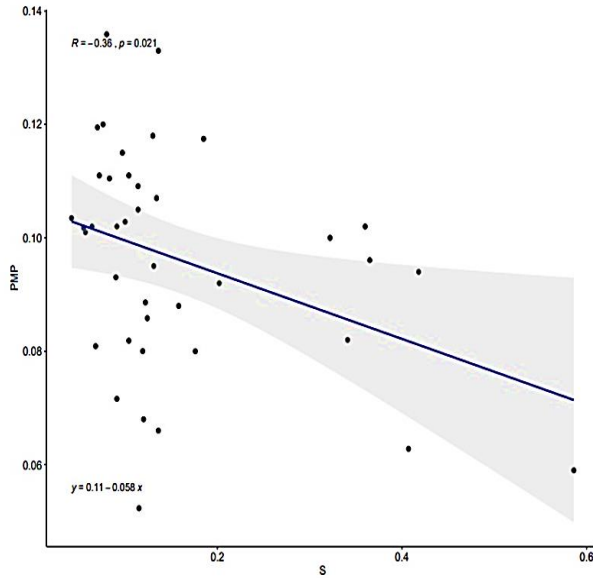
Continuação..



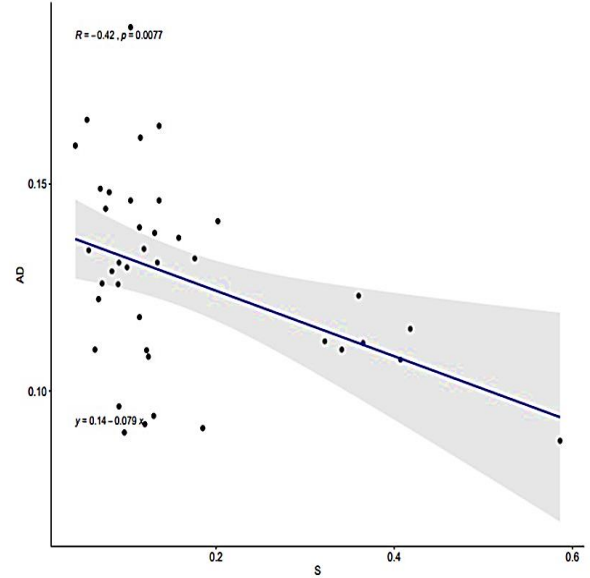
(e) $\alpha \times S$



(f) $\theta_{CC} \times S$



(g) $\theta_{PMP} \times S$



(h) $\theta_{AD} \times S$

Verifica-se na Figura 10, que houve correlação linear negativa entre as variáveis $\rho \times S$ (a), $Ma \times S$ (c), $\theta_{CC} \times S$ (f), $\theta_{PMP} \times S$ (g) e $\theta_{AD} \times S$ (h) e linear positiva entre $\rho_{max} \times S$ (b), $Mi \times S$ (d), $\alpha \times S$ (e). Levando-se em consideração os critérios de classificação propostos por Oliveira et al. (2018), para valores de correlação linear sendo: $0,7 \leq r \leq 1,0$, para correlação forte; $0,4 \leq r < 0,6$, para correlação moderada; $0,1 \leq r < 0,3$ para correlação fraca e de $0,0 \leq r < 0,1$, para correlação nula, pode-se afirmar que houve correlação forte entre os atributos água disponível,

capacidade de campo, densidade do solo, microporosidade e porosidade total e o índice S do solo.

Os valores médios de correlação verificados entre a variável dependente S e as variáveis independentes foram $\theta_{AD} \times S = -0,42$; $\theta_{CC} \times S = -0,53$; $\rho \times S = -0,45$; $\rho_{max} \times S = 0,075$; $GC \times S = -0,13$; $Ma \times S = -0,24$; $Mi \times S = 0,50$; $\theta_{PMP} \times S = -0,36$ e $\alpha \times S = 0,46$. Os valores mais significativos foram verificados entre o S e as variáveis densidade do solo, capacidade de campo e porosidade total. Alguns valores de correlação foram diferentes aos verificados por Souza et al. (2015) avaliando a correlação linear entre o índice S e atributos físicos de um Argissolo Amarelo coeso de textura média. No trabalho acima citado, os autores verificaram que houve correlação negativa entre o S e os atributos microporosidade e densidade do solo e positiva entre S e a porosidade total e macroporosidade.

Como o índice S está relacionado aos fatores estruturais do solo (OLIVEIRA et al., 2015), talvez no Argissolo, a influência estrutural sobre a correlação entre o índice S e os atributos físicos de solo seja mais pronunciada que no Planossolo, por apresentar predominância de areia e elevada capacidade de aeração. Talvez, no Planossolo Háptico, a correlação entre os atributos físicos de solo e o S estejam mais ligados a textura do que à estrutura, como observado pelo valor de correlação moderado entre o S e a microporosidade do solo (Figura 10 d).

No caso da macroporosidade, por ser um atributo estrutural, a sua distribuição no solo passa a depender das práticas de manejo adotadas, comprometendo a qualidade física do solo, mesmo variando de 0,10 a 0,15 m³ m⁻³. Na Figura 10, também pode ser verificado que em todos os gráficos houve uma forte dispersão dos dados em relação à média, principalmente para o atributo ρ_{max} que apresentou uma correlação linear quase nula com o índice S. Para os valores de correlação linear negativa, verifica-se que o índice S reduziu com o aumento de umidade na capacidade de campo e a densidade do solo (Figura 10; a, f), indicando forte relação entre a degradação física da estrutura do solo e o índice S (TORMENA et al., 2008).

Rossetti e Centurion (2008) avaliando o uso do índice S como indicador de qualidade física estrutural para solo compactado e cultivado com milho, observaram correlação positiva com a macroporosidade do solo e negativa com a densidade do solo, enquadrando-se como um fraco indicador de qualidade física estrutural para o Latossolo vermelho. O índice S apresenta forte sensibilidade às mudanças estruturais do solo (SILVA et al., 2012) e como o Planossolo avaliado por esse estudo apresenta acentuado teor de areia, talvez a baixa estabilidade estrutural tenha favorecido a obtenção de valores de correlação negativos entre alguns atributos estruturais como capacidade de campo e macroporosidade, com o índice S do solo.

Alencar et al. (2018) verificaram que o índice S é um atributo físico fortemente influenciado pela fração porosa do solo, sendo a porosidade total e a continuidade de poros os de influência mais significativa. Apesar de encontra-se valores de correlação negativa para a macroporosidade e positiva para a microporosidade, verifica-se na Figura 10, correlação linear moderada entre a porosidade total e o índice S do solo. Esses dados confirmam a informação apresentada por Alencar et al. (2018), já que a porosidade total é caracterizada pelo somatório das classes de poros do solo, representada pelos estruturais e texturais.

Barreto et al. (2014) avaliando a correlação entre o índice S com atributos físico-hídricos em solo aluvial do Rio Grande do Norte observaram correlação linear negativa a ($p < 0,01$) entre o índice S e a macroporosidade independente da camada de solo avaliada. Esse resultado pode estar relacionado aos teores elevados de Areia, já que Dexter (2004) salienta que o teor de argila está intimamente ligado à estrutura do solo, podendo refletir condições estruturais do solo quando não antropizado.

Nesse caso verifica-se que altas concentrações de Areia podem refletir em valores significativos entre a macroporosidade e índice S, pois no presente estudo verificaram-se teores de argila variando de 158-167 g kg⁻¹ na camada de 0,00-0,10 m e de 160 a 167 na camada de 0,10-0,20 m (Tabela 5).

Em se tratando de índices de qualidade estrutural do solo e dos fatores que atuam na formação e estabilidade estrutural, apresentam-se na Tabela 14, os valores médios relacionados aos atributos carbono orgânico total (COT), estoques de carbono (ESTC), taxa de recuperação de carbono (TREC), índice de compartimentação de carbono (ICC) e o índice de estabilidade estrutural do solo (IEE). O índice de estabilidade estrutural foi avaliado conforme escala de valores apresentada por Pieri (1992), sendo: $> 9\%$ - estrutura estável; $7\% < \text{IEE} \leq 9\%$ - indica baixo risco de degradação estrutural; $5\% < \text{IEE} \leq 7\%$ - alto índice de degradação; $\text{IEE} \leq 5\%$ - solo estruturalmente degradado. Já os teores de COT foram avaliados quanto aos níveis de adequação proposto por Nascimento et al. (2019) através de adaptação do manual de adubação e calagem para os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (CQFS-RS/SC, 2004), onde o valor ideal deve ser $15 \leq \text{COT} \leq 30$.

Verifica-se que houve variação estatística significativa para COT ao nível ($p < 0,05$) entre os tratamentos avaliados na camada de 0,00-0,10 m, destacando-se os tratamentos BD com 16,5 g kg⁻¹ com maior valor médio e BG = 10,8 16,5 g kg⁻¹ com menor média. Levando-se em consideração o proposto por Nascimento et al. (2019), com exceção do tratamento BD, todos os demais tratamentos ficaram abaixo do limite ideal para os teores de COT. Nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20 a 0,30 (Tabela 13) houve redução acentuada nos teores de carbono orgânico

total em relação a camada superficial, fato esse esperado, já que grande parte do carbono aportado ao solo se encontra em superfície.

Tabela 13. Teor, estoques, taxa de recuperação, compartimentação de carbono e índice de estabilidade estrutural de Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Sistemas	COT	ESTC	TREC	ICC	IEE
	-- g kg ⁻¹ --	-- Mg ha ⁻¹ --	-- % --	-----	-- % --
0,00-0,10 m					
BI	13,7 ab	18,7 a	138,0 a	1,38 a	4,73 a
BG	10,8 b	14,8 a	201,0 a	2,02 a	3,63 a
BS	14,8 ab	19,7 a	141,0 a	1,41 a	4,58 a
BD	16,5 a	22,5 a	211,0 a	2,11 a	4,46 a
LA	14,6 ab	19,0 a	126,0 a	1,26 a	5,18 a
CV %	12,8	14,1	19,1	19,1	13,0
0,10-0,20 m					
BI	14,0 a	19,9 a	140,0 a	1,40 a	3,81 a
BG	11,9 a	16,4 a	140,0 a	1,40 a	3,91 a
BS	11,7 a	16,5 a	133,0 a	1,33 a	4,01 a
BD	13,0 a	18,3 a	118,0 a	1,18 a	4,32 a
LA	12,2 a	16,7 a	126,0 a	1,26 a	3,71 a
CV %	9,3	10,8	10,1	10,1	9,4
0,20-0,30 m					
BI	11,5 a	16,6 a	135,0 a	1,35 a	3,52 a
BG	11,5 a	16,5 a	124,0 a	1,24 a	3,95 a
BS	10,6 a	15,0 a	131,0 a	1,31 a	3,62 a
BD	11,3 a	16,2 a	125,0 a	1,25 a	3,06 a
LA	11,0 a	15,5 a	129,0 a	1,29 a	3,45 a
CV %	9,0	10,1	8,4	8,4	8,8

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoua anual, CV = Coeficiente de variação. COT = Carbono orgânico total, ESTC = Estoque de carbono, TREC = Taxa de recuperação de carbono, ICC = índice de compartimentação de carbono, IEE = Índice de estabilidade estrutural. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Não houve variação estatística significativa para o ESTC em nenhuma das três camadas de solo avaliadas, contudo os valores médios foram reduzindo com o aumento de profundidade. Avaliando-se a amplitude entre os maiores e menores valores nas três camadas de solo avaliadas, verificou-se $\Delta = 7,7 \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 0,00-0,10 m, $\Delta = 3,5 \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 0,10-0,20 m e $\Delta = 1,6 \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 0,20-0,30 m, fato esse relacionado a maior deposição de carbono na camada superficial do solo. Silva et al. (2011) avaliando as frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária observaram valores significativos para o COT, considerados semelhantes ao sistema plantio direto. Para os autores, os sistemas conservacionistas de produção agropecuária como o iLP, com oito e quatro anos de instalação, apresentaram teores de C semelhantes ao sistema plantio direto com 23 anos de implantação, nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Os sistemas de produção integrada, favorecem o aporte de carbono ao solo em função da permanência de material vegetal em superfície, seja proveniente do componente arbóreo, ou mesmo das gramíneas e da lavoura. Segundo Lal (2004), nos sistemas tradicionais de produção, onde se converte a vegetação nativa em cultivo agrícola ou florestal, geralmente resulta na diminuição de 20 a 50% nos teores de COT, valor bastante significativo. Silva et al. (2016) também verificaram acúmulo de carbono no solo em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta em comparação ao ambiente de mata e monocultivo de árvores. Nunes et al. (2011) afirmam que a presença de gramíneas em consórcio com espécies florestais, contribuem para o maior acúmulo de COT em superfície, pois boa parte do sistema radicular está localizada na superfície do solo, elevando desse modo os teores de carbono.

Outros autores avaliando o acúmulo de carbono orgânico do solo sob diferentes sistemas de manejo, verificaram maior aporte em superfície e decréscimo com o aumento de profundidade, corroborando com os valores médios encontrados pelo presente estudo. Os trabalhos que verificaram esse comportamento foram Kato et al. (2010), Nunes et al. (2011), Rossi et al. (2012) e Matoso et al. (2012). Esses resultados confirmam a hipótese de que os sistemas de integração ao longo prazo promovem melhorias físicas e químicas no solo, destacando-se o aporte contínuo de carbono ao longo do tempo.

O aporte de COT pelo iLPF equiparado ao de sistemas conservacionistas como o plantio direto, deve ocorrer pelo maior aporte de menor fragmentação de resíduos orgânicos, o que causa a diminuição da decomposição pelos microrganismos (SILVA et al., 2016), favorecendo a manutenção de condições físicas favoráveis para o melhor aproveitamento e exploração do solo pelo sistema radicular, principalmente das gramíneas, elevando a eficiência no acúmulo de carbono ao solo (D'ANDRÉA et al., 2004).

Comparando-se aos resultados apresentados por Silva et al. (2019), verifica-se que houve redução nos teores de COT para os tratamentos BG, BS, BI e LA, comparando-se os resultados do ano de 2019 aos resultados de 2017, quando houve a primeira avaliação. O tratamento que apresentou melhorias ao longo desse tempo foi o BD com o acréscimo de $0,510 \text{ g kg}^{-1}$ entre 2017 e 2019. A mudança de manejo, o pastejo animal ou mesmo as ações de preparo das parcelas ao longo desse tempo, podem ter contribuído nas modificações do teor de carbono aportado. Em relação a camada de 0,10-0,20 observa-se que houve um aumento considerável nos teores de COT para o tratamento BI comparando-se os dados desse estudo com os apresentados por Silva et al. (2019). Assis et al. (2015) salientam que apesar do aporte considerável, as áreas com sistemas integrados de produção agropecuária perdem uma parte do seu carbono quando o sistema é submetido as operações de preparo do solo, mas sem grandes consequências para a resiliência do sistema.

Como forma de evitar a perda de carbono orgânico para o sistema Salton et al. (2011) recomendam a utilização de sistemas de cobertura que possam adicionar material orgânico, proporcionando um balanço entre a adição e retirada ou perda desses elementos por meio dos sistemas de cultivo, pois os estoques de MO em qualquer agroecossistema são obtidos pela interação de fatores que determinam sua formação e aqueles que promovem sua composição.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 14, não houve variação estatística significativa para o ESTC entre os tratamentos avaliados, contudo verifica-se que o tratamento BG foi o único que apresentou incremento no ESTC com o aumento da camada de solo avaliada, diferente dos demais tratamentos avaliados, onde se observou uma rápida redução. Esse fato pode estar relacionado aos valores de densidade e a composição do resíduo aportado nas parcelas, já que a densidade é utilizada no cálculo do ESTC e a *Gliricídia* por ser uma leguminosa apresenta baixa relação C/N favorecendo uma rápida decomposição pelos microrganismos do solo.

Na camada de 0,00-0,10 o maior estoque de carbono foi verificado no tratamento BD com uma média de $22,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, o que equivale a 22,5 toneladas de carbono armazenados no solo/ hectare. Nas demais camadas de solo avaliadas, o estoque de carbono foi superior no tratamento BI, em relação aos demais. A associação entre espécies arbóreas e gramíneas torna-se uma ferramenta importante para manutenção de melhoria de qualidade do solo, pois favorece a manutenção do estoque de carbono, reduz a emissão de gases do efeito estufa e contribui para a sustentabilidade dos sistemas de produção (CARVALHO et al., 2010).

Leite et al. (2013) estudando a qualidade química do solo e dinâmica de carbono sob monocultivo e consórcio de macaúba com pastagem, verificou similaridade para o estoque de

carbono entre os sistemas de manejo avaliados. Contudo, observaram que o estoque de carbono no consórcio entre macaúba e pastagem foi bastante expressivo, para eles esse fato pode ser atribuído ao acúmulo de resíduo de macaúba e dos animais depositados sobre o solo. Além disso, as gramíneas perenes, cultivadas nos sistemas de integração (pastagem) possuem sistemas radiculares abundantes e elevada rizodeposição com distribuição uniforme de exsudatos no solo o que favorece a manutenção do teor de matéria orgânica (CARNEIRO et al., 2009; SILVA JÚNIOR et al., 2009). As vezes nos sistemas de produção, os grãos realizam a extração de nutrientes do solo, reduzindo o estoque de carbono do solo antes que haja um ganho líquido de matéria orgânica em decorrência do manejo integrado (ASSIS et al., 2019).

Os estoques de carbono encontrados nos tratamentos BS e LA na camada de 0,00-0,10 m foram próximos aos valores encontrados por Freitas et al. (2018) avaliando o estoque de carbono em Latossolo sob sistemas de manejo natural e alterado, confirmando a eficácia do sistema integrado de produção agropecuária na manutenção da matéria orgânica do solo. E superior aos valores encontrados por Viana et al. (2011) avaliando atributos físicos de solo e carbono orgânico em Latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo, encontrando 17,8, 16,6, 12,8 e 12,1 Mg ha⁻¹ para mata nativa, pastagem, cultivo de mandioca e cana-de-açúcar, respectivamente.

No entanto, a dinâmica de carbono em ambientes tropicais torna-se diferenciada as regiões temperadas, pois nos trópicos, verifica-se uma rápida perda de carbono orgânico do solo, em decorrência da combinação entre calor e umidade, que facilita a decomposição, e o constante revolvimento do solo contribui para acelerar a oxidação do carbono orgânico (CASTRO FILHO et al., 1991). Os valores médios de ESTC encontrados no presente estudo, só reforçam os resultados encontrados por outros autores avaliando a eficácia do sistema na deposição de MOS, a destacar Costa Júnior et al. (2012), Arruda et al. (2015), Guan et al. (2015) e Sales et al. (2018) ao relatarem que o conteúdo de COS do solo é maior próximo da superfície, por causa dos aportes de matéria orgânica ocorridos via cobertura vegetal.

Manter o estoque de carbono no solo em níveis adequados minimiza o impacto dos cultivos no ambiente, reduzindo os processos erosivos e preservando a biodiversidade do solo ao longo do tempo (SIX et al., 2002; SANTOS et al., 2019). Para a taxa de recuperação de carbono (TREC), observa-se que não houve variação estatística significativa entre os tratamentos avaliados, contudo, todos os valores médios superaram a margem de 100%, indicando que a recuperação de carbono pelos sistemas integrados de produção está sendo superior à deposição de carbono no ambiente de mata.

A taxa de recuperação superior ao da mata nativa (100%), que geralmente é utilizado como sistema de referência, evidencia a capacidade desses sistemas de melhorar a qualidade do solo e promover a sustentabilidade do agroecossistema em regiões tropicais (SILVA et al., 2011), quando os valores de TREC se situam abaixo de 100%, indicam que as práticas de manejo estão ocasionando impacto negativo sobre a matéria orgânica do solo (BLAIR et al., 1995). Levando-se em consideração a eficácia dos sistemas na recuperação de carbono no solo, salienta-se que os tratamentos BG e BD foram os mais eficientes na camada superficial de 0,00-0,10 m, com 211 e 201%, respectivamente. A maior taxa de recuperação apresentada por estes tratamentos em superfície pode ser explicada pela ausência de revolvimento do solo e remoção dos resíduos vegetais sobre as parcelas experimentais, como também da incorporação dos resíduos vegetais advindos do roço de ervas daninhas e a possível presença de carbono recalcitrante advindo das técnicas de manejo antes da instalação do sistema (LINHARES et al., 2016).

Em alguns tratamentos a TREC na camada de 0,20-0,30 m, foi superior nas camadas superficiais, com destaque para o BD e LA, provavelmente influenciada pelo sistema radículas das gramíneas, através da decomposição nas camadas mais profundas do solo, ou mesmo pela incorporação ocasionada pelas práticas de preparo do solo. Também podem estar relacionadas ao acúmulo de argila em subsuperfície, já que a interação entre a matéria orgânica e partículas do solo favorecem a formação de agregados e a proteção do carbono por um longo intervalo de tempo.

A recuperação de carbono pelos sistemas integrados, envolve um conjunto de fatores que são fundamentais para a sustentabilidade do agroecossistema. Consiste no conjunto de materiais orgânicos gerados por organismos autótrofos do reino vegetal, sendo que em florestas é composto pela biomassa viva acima do solo, composta pela serapilheira, troncos caídos e miscelâneas e abaixo do solo por raízes e matéria orgânica (ROQUETTE, 2018). Esse conjunto de fatores é fundamental no aporte e manutenção da taxa de recuperação de carbono no solo.

A superioridade na taxa de recuperação de carbono pelo tratamento BD está ligado ao fato de que as gramíneas apresentam um sistema radicular robusto e elevada produção de matéria seca com uma relação C:N significativa, permanecendo mais tempo no sistema até ser decomposta pelos microorganismos. Carmo et al. (2012) salienta que as gramíneas apresentam raízes finas e abundantes com alta relação C:N, que associadas a menor taxa de decomposição e o não revolvimento do solo, favorecem a deposição e o acúmulo de carbono no solo. Se fosse levado em consideração os valores de recuperação de carbono pelos tratamentos avaliados nesse

estudo, em ordem decrescente, poderia-se seguir a seguinte ordem $BD > BG > BD > BI > LA$, para as três camadas de dolo avaliadas.

Quanto ao índice de compartimentação de carbono (ICC), verifica-se que não houve variação estatística significativa entre os tratamentos, seguindo o comportamento apresentado pela TREC, já que o mesmo é utilizado na taxa de recuperação de carbono por sistemas de manejo. Contudo, torna-se uma variável de grande importância, já que o mesmo é utilizado nos cálculos do índice de manejo de carbono em solos (SILVA et al., 2011). Portanto, passa a ser utilizado na avaliação das mudanças dos teores de COT entre um sistema de referência, geralmente vegetação nativa com um sistema cultivado, predizendo a eficiência de sistemas de manejo do solo sobre a recuperação ou perda de carbono.

Para o índice de estabilidade estrutural do solo IEE, com exceção do tratamento LA na camada de 0,00-0,10 m, todos os demais tratamentos foram classificados como estruturalmente degradado, por apresentar um $IEE < 5\%$ (Tabela 14). O tratamento LA foi classificado com alto índice de degradação, por estar na faixa $5\% < IEE \leq 7\%$. Os valores do IEE diminuíram com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada. Vários fatores podem explicar esse comportamento, o primeiro em superfície, por causa do elevado teor de areia, pois quanto menor o teor de argila do solo, menor o IEE e, o segundo pelo reduzido teor de COT em subsuperfície, já que o mesmo é utilizado no cálculo de estabilidade estrutural do solo.

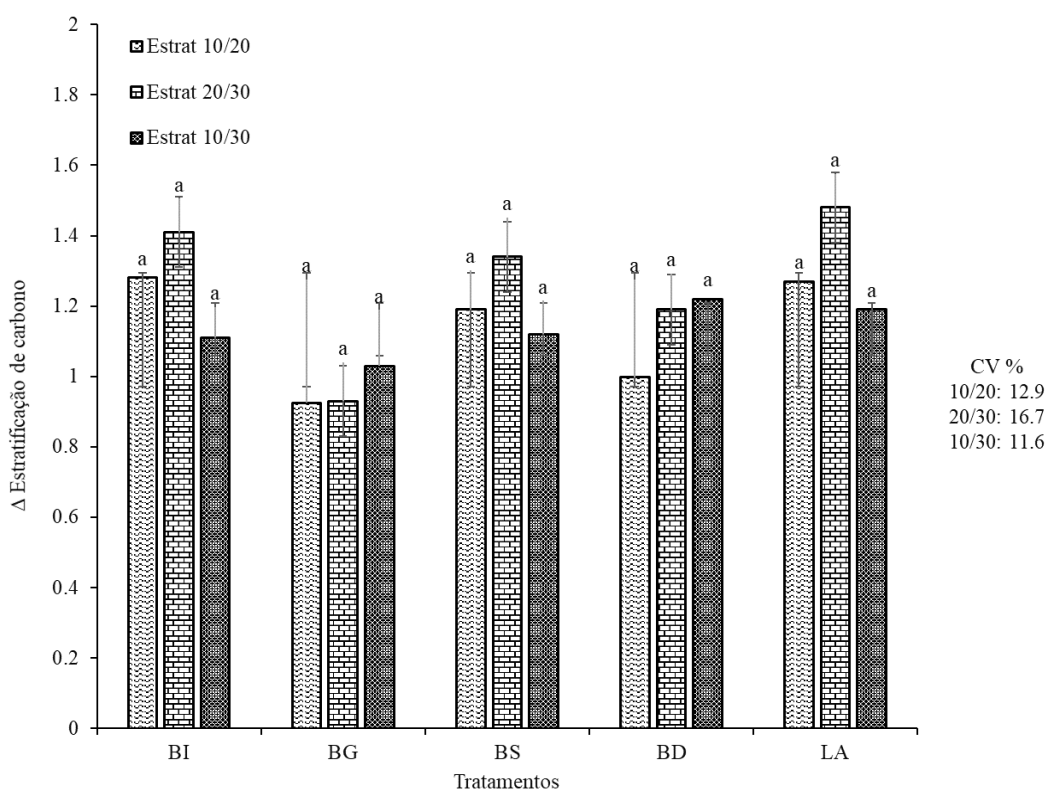
Apesar dos valores baixos, o IEE não se mostrou como um bom indicador de qualidade estrutural do solo para a condição estudada pelo presente trabalho. Observando-se os dados de GF apresentados na Tabela 5, pode-se afirmar que o baixo GF com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada, compromete de forma bastante significativa a estrutura do solo, enquadrando-a em patamares de classes de solos considerados improdutivos.

Os valores médios verificados nesse estudo ficaram abaixo dos valores encontrados por Malheiro (2017) avaliando a qualidade física do solo em Latossolo Vermelho e Cambissolo Háplico sob sistema de integração. O autor verificou que o índice de estabilidade estrutural ficou acima de 7% em todas as camadas de solo avaliadas, separadamente ou em conjunto, indicando que os solos avaliados apresentam baixo risco de degradação estrutural. Os valores variando entre 3,71 e 4,01% na camada de 0,10-0,20 m e 3,06 e 3,95% na camada de 0,20-0,30 m, indicam que a melhoria na estrutura do solo é um processo bastante lento, e medidas de manejo devem ser mantidas de forma permanente a fim que não haja comprometimento físico ao solo.

Como a textura do solo é um atributo estável, a manutenção de sistemas de manejo que favorecem o maior aporte de carbono em subsuperfície poderia elevar os valores do IEE de

forma rápida, elevando a capacidade de suporte do solo para a manutenção das atividades agropecuárias. Nesse contexto pode-se afirmar que o consórcio entre milho e *Brachiaria decumbens*, no tratamento LA, estão sendo mais eficientes que o componente arbóreo na melhoria física da estrutura do solo. Em relação a estratificação de carbono ΔEC , verifica-se que não houve variação significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos avaliados, nas três camadas de solo (Figura 11).

Figura 11. Estratificação de carbono em Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.



BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoura anual, CV = Coeficiente de variação.

Nos tratamentos BI, BS e LA, a taxa de estratificação de carbono foi superior para a camada de 0,10-0,20/0,20-0,30 m em relação as demais camadas de solo avaliadas, com valores médios superiores a 1,5. Apenas dois tratamentos apresentaram taxa de estratificação superior entre as camadas de 0,00-0,10:0,20-0,30 m, BG e BD, demonstrando haver maior deposição de carbono em superfície (Figura 11). Segundo Tormena et al. (2004), sistemas de manejo com maior estratificação de carbono, conseguem suportar maiores restrições físicas, associadas à maior taxa de acúmulo de C na camada superficial do solo.

Em sistemas conservacionistas de produção, cultivos perenes e área de vegetação nativa, onde não se realiza o revolvimento da camada arável do solo, a deposição de resíduos ocorre na superfície e em função desse processo, muitos atributos físicos são submetidos à estratificação em profundidade, acumulando em grandes quantidades na superfície, melhorando a qualidade do solo através da formação de agregados e aeração, os quais influenciam significativamente na atividade microbiana do solo (FRANZLUEBBERS et al., 2007; SÁ; LAL, 2009; MOURA et al., 2015).

No tratamento BG a estratificação de carbono entre as camadas 0,00-0,10; 0,10-0,20 m e 0,10-0,20; 0,20-0,30 m, apresentaram valores abaixo de 1,0, enfatiza-se então que a deposição de carbono ao solo nesse tratamento não está sendo realizada de forma tão eficiente quanto aos demais, com relação a camada de 0,00-0,10; 0,20-0,30 m o valor de estratificação ficou um pouco acima de 1,0, demonstrando que em relação a camada mais subsuperficial, o sistema está começando a promover uma leve melhoria no acúmulo de carbono.

Para Silva e Machado (2000), o aumento da relação de estratificação observado nos tratamentos sob integração, comprovam a eficácia em melhorar a atividade microbiana, uma vez que a presença de resíduos orgânicos, ao proteger o solo do impacto do manejo e clima, também diminui a emissão de gases causadores do efeito estufa CO_2 para a atmosfera, aumentando o sequestro de carbono no solo. Geralmente os efeitos positivos oriundo das análises de ΔEC são mais pronunciados na superfície, em função das condições de manejo e da maior atividade microbiana (SÁ; LAL, 2009).

É nítida a diferença entre os valores médios de ΔEC entre as camadas superficiais e a camada de 0,20-0,30 m, pois em profundidade, alguns atributos físicos são modificados através da ação mecânica, ou mesmo através de processos naturais, como a eluviação e desargilização, favorecendo a formação de camadas de impedimento físico, compactadas, que acarreta a modificação de inúmeros outros atributos como densidade do solo, capacidade de aeração e infiltração de água no solo.

O comprometimento físico a esses atributos reduzem a distribuição de raízes nessa camada, trazendo como possíveis consequências o menor aporte de MOS e exsudados, além de redução da atividade microbiana. Franzluebbbers (2002) afirma que elevadas relações de estratificação da matéria orgânica do solo, indicam solos preservados, em equilíbrio, com elevada qualidade na camada superficial, e consequentemente apresentam melhorias nas taxas de infiltração de água, aumento da macroporosidade e capacidade de aeração do solo, maior estabilidade de agregados e suprimento adequado de nutrientes ao longo do tempo.

Nesse caso, pode-se afirmar que os tratamentos BI, BD e LA apresentam valores de estratificação de carbono que demonstram melhorias físicas, químicas e biológicas do solo na camada superficial ao longo do tempo de manutenção das práticas conservacionistas. Subtende-se que após o período inicial de estabelecimento do sistema, quando estiver consolidado, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta tende a favorecer inúmeros benefícios para o ambiente através da conservação do solo. Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta geralmente apresentam níveis mais elevados de carbono orgânico total em relação aos sistemas agrícolas convencionais, pois no iLPF as gramíneas produzem grande quantidade de biomassa e raízes (VIZOLI et al., 2019), diferente dos sistemas convencionais, onde o revolvimento do solo acelera o processo de oxidação e perdas de carbono para a atmosfera. Na Tabela 14, encontram-se apresentados os valores médios para atributos químicos de solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no Agreste da Paraíba. Verifica-se que não houve variação estatística significativa ($p < 0,05$) entre tratamentos independente da camada de solo avaliada.

Tabela 14. Atributos químicos e de fertilidade de um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Sistemas	K ⁺	P	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al ³⁺
	----- mg dm ⁻³ -----					----- cmol _c dm ⁻³ -----		
0,00-0,10 m								
BI	74,6 a	3,66 a	0,00 a	2,13 a	2,15 a	4,28 a	0,12 a	6,07 a
BG	71,4 a	4,12 a	0,00 a	1,84 a	2,06 a	3,90 a	0,17 a	6,16 a
BS	58,6 a	6,26 a	0,00 a	2,92 a	1,84 a	4,76 a	0,11 a	5,93 a
BD	106,1 a	18,36 a	0,00 a	2,35 a	2,18 a	4,53 a	0,11 a	5,71 a
LA	129,5 a	11,02 a	0,00 a	2,86 a	1,92 a	4,78 a	0,13 a	5,48 a
CV %	60,3	79,2	230,9	22,1	20,8	17,3	42,8	13,3
0,10-0,20 m								
BI	48,9 a	2,33 a	0,00 a	2,12 a	1,70 a	3,81 a	0,50 a	8,22 a
BG	34,6 a	2,29 a	0,00 a	2,11 a	1,05 a	3,16 a	0,42 a	7,89 a
BS	25,9 a	3,87 a	0,00 a	2,33 a	1,23 a	3,56 a	0,50 a	8,00 a
BD	56,0 a	10,47 a	0,00 a	1,87 a	1,68 a	3,55 a	0,60 a	8,44 a
LA	109,3 a	3,87 a	0,00 a	2,79 a	1,20 a	3,99 a	0,23 a	6,58 a
CV %	101,2	85,8	319,1 a	29,1	51,8	24,5	63,1	17,2
0,20-0,30 m								
BI	72,6 a	1,69 a	0,02 a	2,29 a	1,58 a	3,87 a	0,56 a	7,85 a
BG	63,6 a	1,86 a	0,01 a	1,63 a	2,21 a	3,84 a	0,80 a	8,89 a
BS	69,5 a	2,04 a	0,03 a	1,88 a	1,53 a	3,42 a	0,51 a	7,30 a
BD	116,2 a	2,22 a	0,01 a	1,87 a	1,73 a	3,60 a	0,55 a	7,51 a
LA	66,5 a	2,65 a	0,00 a	1,99 a	1,47 a	3,46 a	0,65 a	8,20 a
CV %	53,7	19,7	54,1	30,8	24,0	15,2	39,1	11,1

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoura anual, CV = Coeficiente de variação. K⁺ = Potássio, Na⁺ = Sódio, Ca²⁺ = Cálcio, Mg²⁺ = Magnésio, Al³⁺ = Alumínio, H⁺ = Hidrogênio. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O teor de potássio (K⁺) não diferiu estatisticamente entre os tratamentos avaliados, contudo, foram classificados de médio a muito alto, conforme a classificação proposta pelo manual de adubação de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (2004). Houve redução no teor de potássio entre as camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 e aumento entre as camadas de 0,20 (Tabela 14), provavelmente em função da distribuição de argila na camada subsuperficial.

As concentrações de potássio variaram de 58,6 a 129,5 mg dm⁻³ na camada de 0,00-0,10 m, de 25,9 a 109,3 mg dm⁻³ na camada de 0,10-0,20 m e 63,6 a 116,2 na camada de 0,20-0,30 m, destacando-se o tratamento LA com as maiores médias 129,5 e 109,3 mg dm⁻³, respectivamente. Esse resultado corrobora com os resultados obtidos por Ferreira et al. (2009) avaliando a concentração de potássio do solo em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no estado do Rio Grande do Sul, para eles a ausência de pastejo nos sistemas de integração, apesar de propiciarem menor ciclagem de K⁺, resultam em maiores teores do nutrientes no solo, já que em áreas intensamente pastejadas, o elemento é perdido através do consumo excessivo e do processo de degradação ocasionado pelo pisoteio animal.

Wilkinson e Lowrey (1973), as concentrações de K⁺ no solo estão relacionadas ao excreta dos animais, já que do total de 100% do elemento consumido pelos animais através da pastagem, 10% é absorvido pelo organismo e 90% é liberado para o ambiente na forma de fezes e urina, na forma iônica, solúvel em água e prontamente disponível para as plantas. A análise química solo (Tabela 2), realizada antes da instalação do iLPF avaliado pelo presente estudo, indicou altas concentrações de K⁺ no solo, favorecendo sua manutenção no solo através da decomposição da serapilheira proveniente das espécies arbóreas e gramíneas implantadas no sistema, além dos excrementos provenientes dos animais durante o período de pastejo.

As pastagens, por serem permanentes, possuem a capacidade de ciclar os nutrientes dentro do sistema de produção e traze-los das camadas mais profundas para as mais superficiais do solo, promovendo maior disponibilidade à cultura sucessora (FERREIRA et al., 2009), sem a necessidade da reposição via adubação com fertilizantes químicos. Para Gassen e Gassen (1996) a palhada é uma das principais fontes de reserva de nutrientes, cuja disponibilidade pode ser rápida e intensa, dependendo, dentre outros fatores, do regime de chuva. Essa afirmativa pode explicar, então, as altas concentrações de K⁺ no tratamento LA nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, pois, já que o K⁺ em termos proporcionais é o elemento mais extraído do solo pelo milho (SÁ et al., 2011) e sua liberação no sistema através da decomposição, geralmente leva 90 dias, tornando-se então uma excelente alternativa para a ciclagem do nutriente ao solo (MENDONÇA et al., 2015).

Para o fósforo (P) os teores variaram de muito baixo a médio, levando-se em consideração a classificação do elemento para solos com teor de argila variando de 200 a 400 g kg⁻¹. Houve redução dos teores de p com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada (Tabela 14), sendo classificado como muito baixo na camada de 0,20-0,30 m. Os tratamentos com maior teor de P foram BD e LA com 18,36 e 11,02 mg dm⁻³ na camada de 0,00-0,10 m e BD com 10,47 mg dm⁻³ na camada de 0,10-0,20 m. Os resultados para o P e K⁺

demonstram que mesmo sem variação estatística significativa, os tratamentos BD e LA não apresentam restrições químicas ligadas a esses elementos, classificando-os como férteis.

Diel et al. (2014) avaliando a distribuição horizontal e vertical de fósforo em sistemas exclusivos de soja e de integração lavoura-pecuária-floresta, observaram que os teores de P disponível foram maiores na camada superficial do solo e que aos dois anos de implantação o sistema de integração não é capaz de interferir marcadamente nas características químicas do solo, favorecendo a disponibilidade de P para as plantas.

Quando dimensionados de forma correta, os sistemas iLPF elevam a eficiência de utilização de nutrientes, principalmente a do fósforo, que é o elemento mais limitante à produtividade em solos tropicais (DIEL et al., 2014). A inclusão de componente arbóreo nos sistemas integrados de produção agropecuária, pode influenciar na quantidade e disponibilidade desse nutriente na zona de absorção radicular das culturas consorciadas, pois, por ser mais profundo, o sistema radicular das árvores intercepta os nutrientes localizados em camadas do solo pouco acessíveis às raízes das culturas agrícolas ou forrageiras, disponibilizando-os na superfície do solo (CASTRO et al., 1996; LOSS et al., 2011).

Não se observou teores de sódio (Na^+) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 em nenhum dos tratamentos avaliados no sistema de integração, encontrando-se apenas valores médios variando de 0,01 a 0,03 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0,20-0,30. Segundo Sobral et al. (2015), em solos intemperizados o teor de (Na^+) é um tanto quanto desprezível e seu efeito é prejudicial as plantas, quando o pH do solo este próximo de 9,0, elevando sua concentração na solução do solo. Apesar dos Planossolos apresentarem como característica, consideráveis concentrações de (Na), verifica-se nesse estudo a ausência desse elemento nas camadas superficiais do solo.

A ausência desse elemento em superfície, pode estar relacionada a lixiviação ocasionada pelo teor elevado de areia, ocasionando o seu acúmulo nas camadas mais profundas do solo, onde se verifica maiores concentrações de argila. Para os teores de Cálcio (Ca^{2+}), verifica-se na Tabela 17, que os valores médios foram classificados de baixo a médio, e reduziram com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada.

Na camada de 0,00-0,10 m os valores médios variaram de 1,84 a 2,92 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, de 0,20-0,30 m os valores médios variaram de 1,87 a 2,79 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e 1,66 a 2,29 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0,20-0,30. Verifica-se que não houve variação estatística significativa entre os tratamentos nas três camadas de solo avaliadas. O tratamento BI manteve os teores na faixa considerada média nas três camadas de solo avaliadas. Para Santos et al. (2013) a maior concentração de bases em superfície como Ca^{2+} e Mg^{2+} são atribuídas aos maiores teores de carbono orgânico, a ciclagem de nutrientes e o manejo do solo com correção e adubação.

O Magnésio apresentou comportamento diferente do Ca, sendo classificado como alto em todos os tratamentos e camadas de solo avaliadas, contudo os valores médios foram reduzindo em profundidade. Verifica-se que quatro anos após instalação do iLPF houve aumento nos teores de Mg em todas as camadas de solo avaliadas, se comparado aos resultados da análise de caracterização do solo antes da instalação do sistema (Tabela 2). Valores semelhantes foram encontrados por Santos et al. (2011) e Bonini et al. (2016) e Silva et al. (2019) estudando a produção de forragem e atributos físicos e químicos do solo sob sistemas de integração.

Eles verificaram que o sistema após dois anos de instalação aumentou os teores de Ca e Mg no solo em relação a primeira análise de solo realizada. As alterações químicas do solo em sistemas integrados de produção agropecuária resultam do elevado acúmulo de resíduos vegetais sobre a superfície do solo que, após a decomposição, proporcionam aporte de nutrientes ao sistema e estimulam a atividade biológica (COSTA et al., 2015). Os teores de alumínio trocável (Al) foram classificados como baixo nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 e médios na camada de 0,20-0,30 m, porém sem variação estatística significativa.

Os valores médios variaram entre 0,12 e 0,80 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ entre os tratamentos para as três camadas de solo avaliadas. Para Sobral et al. (2015) recomenda-se realizar correção do solo quando os teores de Al são iguais a 0,50 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, pois se não o fizer, a presença de alumínio no solo pode inibir o crescimento radicular e influenciar na disponibilidade de outros nutrientes para as plantas, além de comprometer o processo de mineralização da matéria orgânica. Ainda segundo Sobral et al. (2015) o alumínio só é prejudicial quando o pH do solo se encontra entre 4,0 e 5,0, acima desses valores entre 5,2 e 5,3 o alumínio torna-se insolubilizado, não ocasionando danos as raízes das plantas. A presença de alumínio em grande quantidade reduz os teores de P, Ca e Mg na parte aérea das plantas, reflexos da redução na taxa de absorção (STEINER et al., 2012).

Os sistemas integrados de produção possuem uma vantagem em relação aos sistemas convencionais de produção no que diz respeito aos efeitos deletérios provocados pelo Al, pois o acúmulo de MOS proveniente da elevada produção de biomassa, favorece a complexação de cátions, incluindo o Al, favorecendo assim o desenvolvimento das plantas (ZAMBROSI et al., 2007). Observa-se na Tabela 15, que não houve variação estatística significativa para a acidez total ou potencial ($\text{H} + \text{Al}^{3+}$) entre os tratamentos e camadas de solo avaliadas. Na Tabela 18 encontram-se os dados de capacidade de troca catiônica (CTC), índice de saturação (V) e soma de bases (SB), matéria orgânica do solo (MOS) e pH.

Tabela 15. CTC, V, pH, SB e MOS em Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Sistemas	MOS	pH	CTC	SB	V
	-- g kg ⁻¹ --	H ₂ O (1:2,5)	----- cmol _c dm ⁻³ -----		-- % --
0,00-0,10 m					
BI	23,5 ab	5,55 a	10,5 a	4,47 a	42,3 a
BG	18,6 b	5,17 a	10,2 a	4,08 a	39,9 a
BS	25,6 ab	5,67 a	10,8 a	4,91 a	45,7 a
BD	28,5 a	5,67 a	10,5 a	4,80 a	46,0 a
LA	25,1 ab	5,62 a	10,6 a	5,12 a	47,9 a
CV %	12.8	7.3	7.9	15.5	13.8
0,10-0,20 m					
BI	24,1 a	5,40 a	12,2 a	3,94 a	33,9 a
BG	20,5 a	4,95 a	11,1 a	3,25 a	29,1 a
BS	20,2 a	4,97 a	11,7 a	3,66 a	31,4 a
BD	22,4 a	5,17 a	12,1 a	3,69 a	30,5 a
LA	21,1 a	5,42 a	10,8 a	4,27 a	39,3 a
CV %	9.3	5.9	7.7	22.1	23.4
0,20-0,30 m					
BI	19,8 a	5,33 a	11,9 a	4,08 a	34,1 a
BG	19,8 a	4,95 a	12,9 a	4,02 a	31,6 a
BS	18,3 a	5,12 a	10,9 a	3,62 a	33,5 a
BD	19,5 a	5,25 a	11,4 a	3,91 a	34,2 a
LA	19,0 a	5,08 a	11,8 a	3,64 a	30,3 a
CV %	9.0	3.1	7.7	13.3	12.3

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoura anual, CV = Coeficiente de variação, MOS = Matéria orgânica do solo, CTC = capacidade de troca catiônica, V = índice de saturação por bases, SB = Soma de bases, pH = Potencial hidrogeniônico. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

Observa-se que houve variação estatística significativa a ($p < 0,05$) para a MOS entre os tratamentos avaliados na camada de 0,00-0,10 m, sendo maior no tratamento BD = 28,5 g kg⁻¹ e menor no tratamento BG = 18,6 g kg⁻¹. Autores como Loss et al. (2009), Souza et al. (2009), Silva et al. (2011) e Gazolla et al. (2015) verificaram aumento nos teores de matéria orgânica na camada superficial do solo em sistemas integrados de produção agropecuária, para eles a

elevada produção de biomassa e o baixo revolvimento do solo nesses sistemas de produção, são fundamentais para a manutenção de valores significativos de MOS sobre o solo.

Em sistemas conservacionistas, a ausência de revolvimento do solo e a permanência do material orgânico, favorecem a maior atividade de organismos responsáveis pela transformação do tecido vegetal em compostos orgânicos, dentre outros elementos fundamentais para o funcionamento do agroecossistema (BARTZ et al., 2014). Os demais atributos não apresentaram variação estatística significativa. A manutenção da matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção é de grande importância para a conservação do solo, pois a palhada acumulada pelas plantas de cobertura ou pastagem e os restos culturais, proporcionam um ambiente favorável à recuperação e manutenção dos atributos físicos e químicos do solo (COSTA et al., 2015).

Para o pH a classificação variou de acidez variou de elevada a média (Tabela 17), encontrando-se os valores médios de 4,96 no tratamento BG profundidade de 0,10-0,20 m e 5,67 para os tratamentos BS e BD na camada de 0,00-0,10 m. Houve redução do pH com aumento de profundidade da camada de solo avaliada. Geralmente em áreas de produção agrícola, a acidez do solo se torna mais acentuada em função da absorção de cátions básicos pelas culturas e pela exportação pelas colheitas e pelo manejo inadequado do solo, favorecendo a erosão e exposição de horizontes subsuperficiais (mais ácidos), pelo uso de fertilizantes nitrogenados e pela oxidação de enxofre da matéria orgânica do solo (SOUZA et al., 2017).

Para a capacidade de troca catiônica ($CTC_{pH\ 7,0}$), observa-se que todos os valores variaram entre 5,0 e 15,0 $cmol_c\ dm^{-3}$, sendo classificada como média. Os valores médios foram superiores nas camadas mais profundas do solo, provavelmente influenciada pelos valores significativos de $H+Al^{3+}$ (Tabela 18). A CTC média observada nos tratamentos está relacionada à acidez do solo, pois, segundo Reichert et al. (2008), o efeito detrimental da acidez do solo no crescimento e na produtividade das plantas depende dos íons H^+ e Al^{3+} na solução do solo, o que está relacionado com as atividades dos teores de Ca, Mg e K, sendo assim, com a neutralização de parte da acidez do solo, as cargas negativas são liberadas no complexo de troca ocupadas por Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , aumentando os níveis de fertilidade do solo, a CTC e a produção agrícola.

Quanto ao índice de saturação por bases, com exceção dos tratamentos BD, LA e BS na camada de 0,00-0,10 m, os demais tratamentos foram classificados com baixo índice de saturação por bases (V). Para Sobral et al. (2015), quando o solo apresenta índice de saturação por bases menor que 50%, indica que o solo tem cargas ocupadas por componentes da acidez, destacando-se os elementos H^+ ou Al^{3+} .

Como o índice de saturação por bases V% corresponde o percentual da CTC ocupada por bases (Ca, Mg, K, Na, H e Al), verifica-se que quando o índice atinge os 70%, não há necessidade de realizar operações de correção do solo com a utilização de calcário (SOBRAL et al., 2015). Como a CTC está relacionada com a reserva de nutrientes do solo, quanto maior for o seu valor, maior a capacidade de os solos reter os cátions em formas prontamente disponíveis para as plantas (MEURER et al., 2007).

O V% mais elevado foi verificado no tratamento LA na camada de 0,00-0,10 m, provavelmente em função da maior quantidade de bases provenientes da calagem realizada antes do plantio do milho. Ciotta et al. (2004) afirmam que o acúmulo de bases em superfície pode estar relacionado à aplicação de fertilizantes e corretivos durante as práticas de manejo, que aliadas ao baixo revolvimento do solo permanecem no ambiente por um período de tempo maior.

Para Costa et al. (2015) as alterações dos atributos químicos nos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta resultam do elevado acúmulo de resíduos vegetais sobre a sua superfície, onde o processo de decomposição vegetal residual, proporcionam aporte de nutrientes ao solo, causando estímulo à atividade biológica que resultam em alterações na sua fertilidade.

4.1 Análise multivariada dos dados (Análise de componentes principais)

Os autovalores provenientes da análise de componentes principais para os atributos físicos de solo encontram-se apresentados na Tabela 16. Verifica-se que 43,49% da análise de variância foi explicada pelo componente principal (1) e 15,78% pelo componente principal (2), totalizando uma variância de 59,27%. O valor de correlação positiva mais significativo (0,328) foi verificado no componente principal 1 – que corresponde a variável α Est. Quanto aos negativos destacaram-se $\rho = -0,296$, GCe = -0,229 e $\rho_R = -0,298$. No componente 2 – destacam-se Ma = 0,396, DMPAs = 0,309 e MacroU = 0,322.

Tabela 16. Análise de componentes principais (ACP) para atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Autovalores	CP 1	CP 2
Variância	8.264	3.000
Variância %	43.492	15.787
Variância acumulada %	43.49	59.27
Variáveis	Valores de correlação	
ρ	-0,296	-0,255
α_{Est}	0,328	-0,072
α	0,297	0,252
Mi	0,291	-0,142
Ma	-0,080	0,396
CAS	0,261	-0,104
θ_{CAR}	0,297	0,252
ρ_{max}	0,144	-0,142
ρ_R	-0,298	-0,196
K_θ	0,261	-0,051
GCE	-0,229	-0,101
MacroS	-0,036	-0,248
MicroS	0,036	0,248
MacroU	0,201	-0,322
MicroU	-0,201	0,322
DMPAs	-0,127	0,309
DMPAu	0,174	-0,105
IEA	0,206	-0,202
IEE	0,254	0,246

ρ = Densidade do solo, α_{Est} = Porosidade total estimada, α = Porosidade total calculada, Mi = Microporosidade, Ma = Macroporosidade, CAS = Capacidade de aeração do solo, θ_{CAR} = Capacidade de aeração relativa, ρ_{max} = Densidade máxima do solo, ρ_R = Densidade relativa do solo, K_θ = Condutividade hidráulica saturada, GCE = Grau de compactação estimado, MacroS = Macroagregados secos, MicroS = Microagregados secos, MacroU e MicroU = Macro e microagregados úmidos, DMPAs e DMPAu = Diâmetro médio ponderado de agregados úmidos e secos, IEA = Índice de estabilidade de agregados, IEE = Índice de estabilidade estrutural.

No diagrama de autovetores (Figura 12), verifica-se a formação de três grupos principais formados pelo grau de similaridade, subdivididos em grupo 1: (BD e LA 0,00-0,10 m), grupo

Ds = Densidade do solo, Pte = Porosidade total estimada, Mi = Microporosidade, Macro = Macroporosidade, CASE = Capacidade de aeração do solo, CAS10 = Capacidade de aeração relativa, Dmax = Densidade máxima do solo, Drelat = Densidade relativa do solo, K_{sat} = Condutividade hidráulica saturada, GCe = Grau de compactação estimado, MacroS = Macroagregados secos, MicroS = Microagregados secos, MacroU e MicroU = Macro e microagregados úmidos, DMPAs e DMPAu = Diâmetro médio ponderado de agregados úmidos e secos, IEA = Índice de estabilidade de agregados, IEE = Índice de estabilidade estrutural, BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, B = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoua anual.

Verifica-se na Figura 12, que os tratamentos BD, LA e BS na profundidade de (0,00-0,10 m), apresentaram similaridade para os seguintes atributos MicoS, IEE, PTc e CAS, discriminando-os dos demais tratamentos avaliados. Os tratamentos BG e BI (0,00-0,10 m) formaram outro grupo de ordenação, por apresentar similaridade entre os atributos: Ksat, Case, PTe, Mi, Dmax, IEA e MacroU. A formação de grupos através do grau de similaridade, demonstram que esses tratamentos estão favorecendo melhorias para esses atributos, com

destaque para os tratamentos BD e LA com porosidade total de (0,50 e 0,49 m³ m⁻³), respectivamente.

Os tratamentos LA (0,10-0,20 m) e BD e BG (0,20-0,30) foram agrupados em relação aos demais tratamentos avaliados por apresentarem os maiores valores para densidade do solo, grau de compactação e densidade relativa do solo. Assis et al. (2019) avaliando atributos físicos de solo através da análise de componentes principais, observaram que na pastagem degradada a densidade do solo é sempre superior aos sistemas integrados de produção agropecuária, em função da compactação ocasionada pelo pisoteio animal e a ausência de revolvimento do solo.

Segundo Borcard et al. (2011), quanto maior for o comprimento de um vetor na análise de componentes principais, mais influente é o mesmo para a explicação dos resultados. No caso do presente estudo os vetores de maior influência na variabilidade dos resultados foram porosidade total estimada e índice de estabilidade estrutural para o grupo (1), percentagem de macroagregados úmidos, índice de estabilidade de agregados, microporosidade e porosidade total estimada para o grupo (2) e densidade relativa, densidade do solo, macroporosidade e percentagem de microagregados úmidos para o grupo (3). Esses atributos mostram-se como os mais sensíveis às mudanças de uso do solo, portanto, podem ser utilizados para avaliar a qualidade do solo em função de sua contribuição para o resultado final da variabilidade.

Apesar de serem consideradas fracas, correlações negativas foram verificadas no componente principal 2 (CP2) em detrimento ao componente principal 1 (CP1), na região inferior do gráfico, com valores de correlação MacroS = -0,248, MacroU = -0,322. Corroborando para a formação de três grupos distintos após quatro anos de implantação do sistema de integração. Silva et al. (2015) avaliando a variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e sua influência na produção de feijão através da análise multivariada, verificaram que os atributos que explicaram a variabilidade da cultura de feijão com (38,6%) foram a densidade do solo, porosidade total e umidades gravimétrica e volumétrica.

Os atributos físico-hídricos do solo (Tabela 17) foram mais sensíveis que os atributos físicos de solo na explicação da variabilidade do coeficiente de variação. 71,85% do coeficiente de variação foi explicado pelos componentes principais (CP1 e CP2), sendo CP1 = 49,35% e CP2 = 22,49%. Os valores de correlação negativa mais significativos para o componente principal 1 (CP1) foram: n = -0,317, m = -0,363, S = -0,360 e o positivo foi: CAD = 0,347. Com relação ao componente principal 2 (CP2), verifica-se predominância de valores de correlação positivos, destacando-se as variáveis θ_{CC} = 0,475, θ_{PMP} = 0,419 e CCr = 0,399. Esses valores foram importantes para a distinção de quatro grupos: 1- (BD 0,00-0,10 m; BI 0,20-0,30

m), 2- (BG 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m; BS 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m), 3- (LA e BI 0,00-0,10 m) e 4 – (LA 0,10-0,20 m), como pode ser verificado na Figura 12.

Tabela 17. Análise de componentes principais (ACP) para parâmetros físico-hídricos e curva de retenção de água no solo para um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

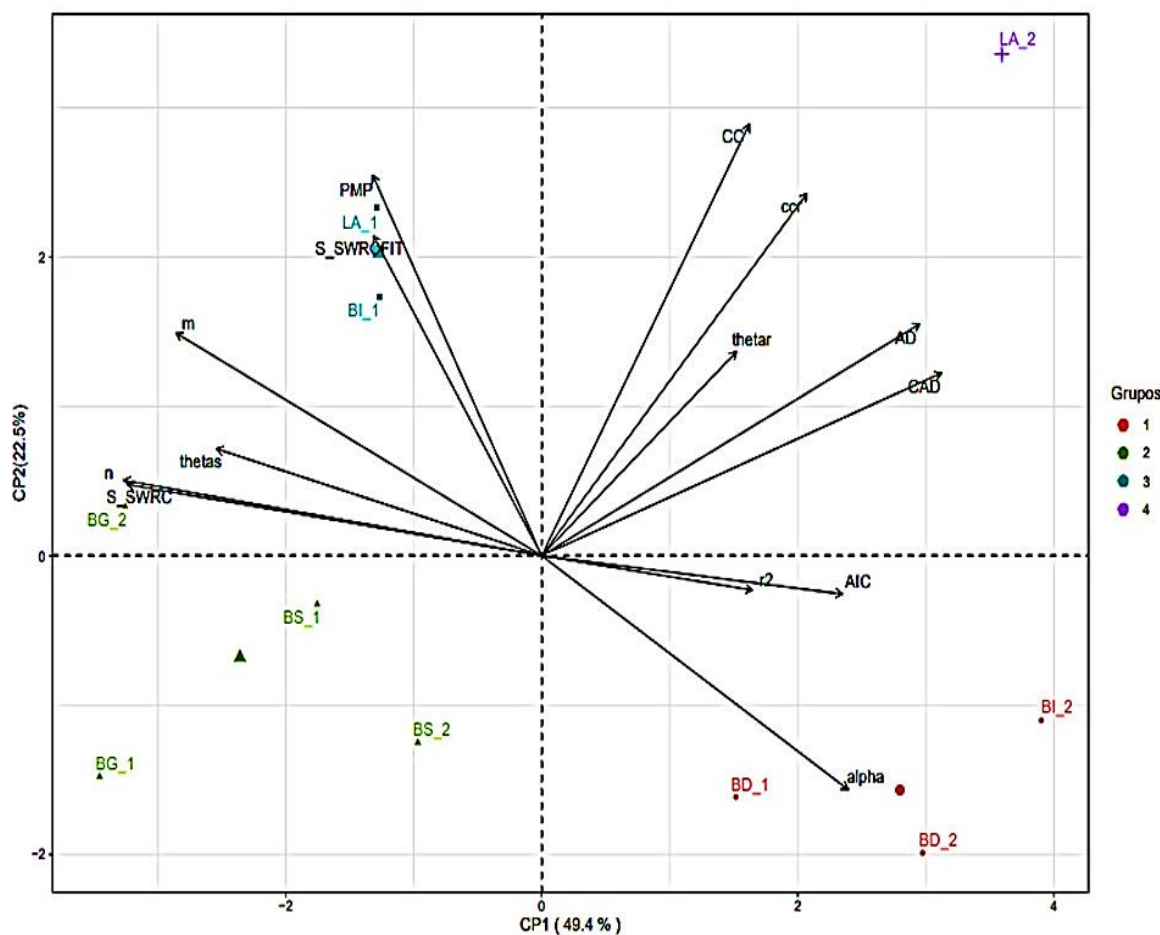
Autovalores	CP 1	CP 2
Variância	6,910	3,149
Variância %	49,356	22,494
Variância acumulada %	49,356	71,850
Variáveis	Valores de correlação	
θ_R	0,169	0,224
θ_S	-0,282	0,117
m	-0,317	0,245
n	-0,363	0,083
α	0,266	-0,257
“S”	-0,360	0,078
R^2	0,182	-0,037
θ_{CC}	0,180	0,475
θ_{PMP}	-0,146	0,419
θ_{AD}	0,328	0,255
CAD	0,347	0,201
CCr	0,230	0,399

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoua anual, CV = Coeficiente de variação, θ_{CC} = Capacidade de campo, θ_{PMP} = Ponto de murcha permanente, θ_{AD} = Água disponível, CAD = Capacidade de água disponível, CCr = Capacidade de campo relativa, S = Índice “S”. θ_S = Umidade de saturação, θ_R = Umidade residual, α , m e n = Parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção, R^2 = Coeficiente de determinação.

Verifica-se na Figura 13, que o tratamento LA (Grupo 4) agrupou o maior número de variáveis relacionadas à retenção e armazenamento de água no solo, destacando-se as: Capacidade de campo e capacidade de campo relativa, umidade residual do solo (θ_R), água disponível e capacidade de água disponível, distinguindo-o dos demais grupos. O grupo 1- (BD 0,00-0,10 m; BI 0,10-0,20 m), foi discriminado pela variável (α), que está relacionada

ao potencial de entrada de ar na matriz porosa do solo, apresentou correlação positiva com o componente principal (CP1) e negativa com o componente principal (CP2).

Figura 13. Diagrama de autovetores para atributos físico-hídricos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.



BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoura anual, CV = Coeficiente de variação, θ_{CC} = Capacidade de campo, θ_{PMP} = Ponto de murcha permanente, θ_{AD} = Água disponível, CAD = Capacidade de água disponível, CCR = Capacidade de campo relativa, S = Índice "S". θ_{S} = Umidade de saturação, θ_{R} = Umidade residual, α , m e n = Parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção, R^2 = Coeficiente de determinação.

Em relação aos vetores, as variáveis capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, capacidade de água disponível, ponto de murcha permanente, (n) e (α), foram as mais representativas entre os tratamentos avaliados, podendo ser utilizadas na avaliação da eficiência dos sistemas integrados de produção agropecuária sobre a melhoria físico-hídrica do solo. Outro fato a ser salientado são as variáveis (R^2) e AIC presentes na parte inferior do gráfico (CP2), os valores de correlação tenderam ao (zero), em função de serem utilizadas apenas nos ajustes das curvas de regressão correspondentes à curva de retenção de água no solo.

Quanto ao índice “S” o mesmo foi calculado de duas maneiras, uma utilizando o software SWRC (DOURADO NETO et al., 2002) e outro através do SWRC-FIT (SEKI, 2007). Na análise de componentes principais optou-se por apresentar apenas os dados referentes ao SWRC, em função dos valores de correlação terem sido mais representativo que o S calculado pelo SWRC-FIT. Comparando-se a formação de grupos através do diagrama de ordenação, pode-se dizer que o tratamento LA favoreceu em maior transformação nos valores de correlação das variáveis físico-hídricas do solo, principalmente para a camada de 0,10-0,20 m.

Observa-se na Tabela 13, que apesar de não ter sido verificada variação estatística significativa entre os tratamentos, o LA foi superior na camada de 0,10-0,20 m para os seguintes atributos capacidade de água disponível (CAD), umidade residual ($\theta_{tar} = \theta_R$), capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, capacidade de água disponível e capacidade de campo relativa. Esse resultado demonstra elevada variabilidade espacial para esses atributos dentro do tratamento LA, que de certa forma estão sendo favorecidos pela integração entre o milho e *Brachiaria* no (LA).

O grupo 2- (BG 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m; BS 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m), teve o menor número de variáveis correlacionadas, destacando-se apenas os vetores correspondentes a (n), S-SWRC e ($\theta_s = \theta_s$) na camada de 0,10-0,20 m. São vetores relacionados a estrutura do solo, então pode-se afirmar que os tratamentos BG e BS estão promovendo melhorias físico-hídricas mais significativas na camada de 0-10 a 0,20 m. Carducci et al. (2014) trabalhando com retenção de água no solo em sistemas conservacionistas de produção, verificaram melhorias físicas significativas após 3 anos de instalação do sistema, evidenciando assim, a sensibilidade dos atributos às mudanças de manejo do solo.

Os atributos físico-hídricos então, podem ser utilizados na predição de alterações estruturais do solo, por apresentarem correlação com vários outros atributos, a destacar a bimodalidade do solo (distribuição de poros por diâmetro), densidade, retenção, capacidade de aeração, teores de areia, argila e carbono orgânico do solo.

O resultado da análise de componentes principais para os atributos químicos do solo encontra-se apresentada na Tabela 18. Observa-se que o componente principal 1 (CP1) explicou 52,00% da variância acumulada, enquanto o componente principal 2 (CP2) correspondeu a 12,14% da variância, totalizando 69,14%. Quanto ao diagrama de autovetores (Figura 13), observa-se a formação de três grupos distintos, dois deles predominando na parte superior do gráfico, com o maior número de variáveis correlacionadas. Os grupos formados foram: grupo 1- (LA, BD, BS e BI 0,00-0,10 m), grupo 2- (BG 0,00-0,10 m) e grupo 3- (BI, BG, BD, LA e BS nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m).

Tabela 18. Análise de componentes principais (ACP) para atributos químicos de um Planossolo Háptico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

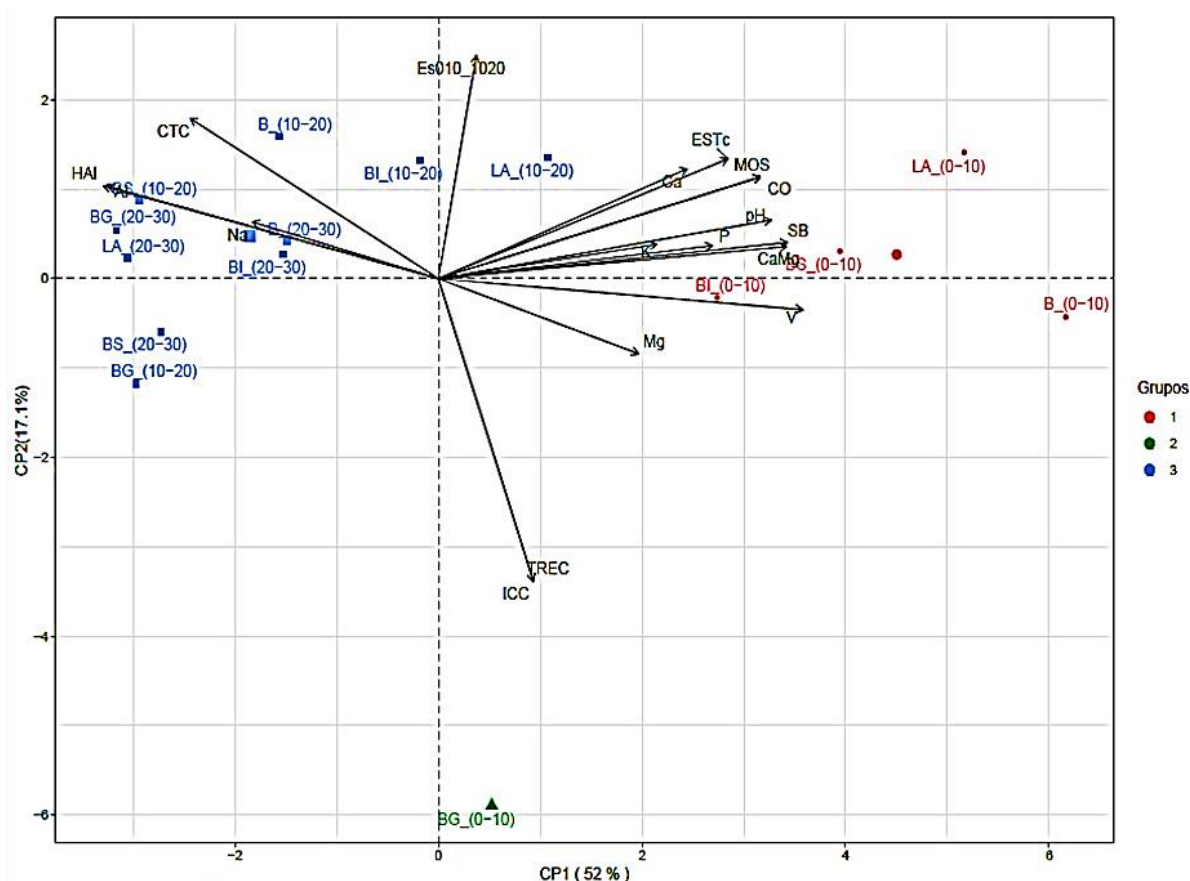
Autovalores	CP 1	CP 2
Variância	9.360	3.086
Variância %	52.001	17.145
Variância acumulada %	52.001	69.145
Variáveis	Valores de correlação	
ICC	0,081	-0,518
TREC	0,082	-0,518
ESTC	0,032	0,382
pH	0,250	0,205
P	0,287	0,100
K	0,236	0,056
Na	0,188	0,058
Ca+Mg	-0,160	0,096
Ca	0,300	0,054
Mg	0,214	0,188
Al	0,172	-0,128
H+Al	-0,289	0,158
COT	-0,289	0,158
MOS	0,278	0,174
SB	0,301	0,061
CTC	-0,214	0,274
V	0,314	-0,053

ICC = Índice de compartimentação de carbono, TREC = Taxa de recuperação de carbono, ESTC = Estoque de carbono, pH = Potencial hidrogeniônico, P = Fósforo, K = Potássio, Na = Sódio, Ca+Mg = Cálcio + Magnésio trocável, Ca = Cálcio, Mg = Magnésio, Al = Alumínio, H+Al = Hidrogênio + Alumínio, COT = Carbono orgânico total, MOS = Matéria orgânica do solo, SB = Soma de bases, CTC = Capacidade de troca catiônica e V = Índice de saturação por bases.

Os valores de correlação mais representativos foram 0,300 para o cálcio, 0,301 para a soma de bases, 0,314 para o índice de saturação por bases e -0,289 para (H+Al), para o componente principal 1 (CP1). Para o componente principal dois, verifica-se valores fortes de correlação para índice de compartimentação de carbono e taxa de recuperação de carbono - 0,518, respectivamente para cada um. Os valores para ICC e TREC são iguais, pois para o

cálculo da TREC, utiliza-se os valores de ICC. O estoque de carbono (ESTC) apresentou uma correlação positiva de 0,382 também no (CP1). Verifica-se no diagrama de autovalores (Figura 14) que o grupo 1- (LA, BD, BS e BI 0,00-0,10 m) distinguiu dos demais pelo número de variáveis acumuladas, destacando-se: Estratificação de carbono (ΔEE 0,10:0,20 m), estoque de carbono, Ca, MOS, COT, pH, SB, K, P, Ca + Mg, V e Mg. Esse resultado demonstra efeito positivo do consórcio entre milho e *Brachiaria*, na melhoria dos atributos químicos do solo, fato esse relacionado aos teores elevados de matéria orgânica do solo.

Figura 14. Diagrama de autovetores para atributos químicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.



ICC = Índice de compartimentação de carbono, TREC = Taxa de recuperação de carbono, ESTC = Estoque de carbono, pH = Potencial hidrogeniônico, P = Fósforo, K = Potássio, Na = Sódio, Ca+Mg = Cálcio + Magnésio trocável, Ca = Cálcio, Mg = Magnésio, Al = Alumínio, H+Al = Hidrogênio + Alumínio, COT = Carbono orgânico total, MOS = Matéria orgânica do solo, SB = Soma de bases, CTC = Capacidade de troca catiônica e V = Índice de saturação por bases.

Resultado semelhante ao encontrado por esse estudo foi verificado em trabalho de Santos et al. (2018) avaliando a comunidade de fungos micorrízicos arbusculares e glomalina em ecossistemas de Mata Seca no Brasil, verificando correlação entre as variáveis P, Ca, Mg, K e pH, no mesmo quadrante. Souza et al. (2018), avaliando atributos químicos de solo em

sistema agroflorestal encontrou forte correlação para os atributos Ca, Ca+Mg, SB, CTC, pH, Mg e MOS. Esses resultados evidenciam o efeito positivo do sistema de manejo e da deposição de MOS sobre a melhoria dos atributos químicos do solo. Suzuki et al. (2007) salienta que a matéria orgânica do solo possui papel fundamental na manutenção do pH do solo e na liberação de nutrientes para as plantas. As alterações provocadas na comunidade de microrganismos do solo através da introdução dos sistemas integrados de produção agropecuária e da condução de culturas em consórcio, interferem na decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, favorecendo a liberação de nutrientes no solo (ASSIS et al., 2019).

Diante dos dados apresentados na Tabela 21 e na Figura 13, pode-se afirmar que os sistemas integrados de produção e mais precisamente o tratamento LA composto pelo consórcio milho + braquiária estão ocasionando efeitos positivos ao solo, sendo uma alternativa viável para a recuperação de áreas improdutivas na mesorregião do Agreste da Paraíba.

4.2 Análise de correlação de Pearson (r)

A análise de correlação de Pearson para os atributos físicos de solo está apresentada na Tabela 19, e os valores foram interpretados utilizando os critérios propostos por (OLIVEIRA et al., 2018), sendo: $0,7 \leq r \leq 1,0$, para correlação forte; $0,4 \leq r < 0,6$, para correlação moderada; $0,1 \leq r < 0,3$ para correlação fraca e de $0,0 \leq r < 0,1$, para correlação nula.

Valores de correlação negativa forte foram verificadas entre as variáveis capacidade de aeração do solo e densidade do solo $\theta_{CAR} \times \rho$ ($r = -1,00$), porosidade total e densidade do solo ($r = -1,00$) e macroporosidade x microporosidade ($r = -0,76$). Outros valores de correlação fortes foram verificados entre os atributos físicos de solo, porém positivos: capacidade de campo x ponto de murcha permanente ($r = 0,73$), capacidade de campo x água disponível ($r = 0,79$), capacidade de campo x capacidade de água disponível ($r = 0,79$), capacidade de campo x capacidade de campo relativa ($r = 0,97$), ponto de murcha permanente x capacidade de campo relativa ($r = 0,70$), água disponível x capacidade de água disponível ($r = 0,98$), água disponível x capacidade de campo relativa ($r = 0,79$) e capacidade de água disponível x capacidade de campo relativa ($r = 0,89$).

Ressalta-se as correlações fortes negativas entre a capacidade de aeração do solo e porosidade total com a densidade do solo, mostrando efeitos negativos da (ρ) sobre a estrutura do solo. Mesmo comportamento foi verificado por Sampietro et al. (2015), para ele está relacionado ao processo de compactação do solo.

Tabela 19. Correlação de Pearson para atributos físicos de Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba. (0,00-0,10 m).

	IEA	IEE	ESTC	ρ	Mi	K _θ	CAS	θ_{CAR}	α	MA	GGe	ρ_{max}	ρ_R	S	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{AD}	CAD	CCr
IEA	1			-0.33				0.31		0.28									
IEE		1	0.40																
ESTC			1	-0.26	0.47	0.45						-0.47					0.45	0.45	
ρ				1		-0.42	-0.50	-1.00	-1.00	-0.44									
Mi					1	0.46	0.46			-0.76	-0.38		-0.38						
K_θ						1	0.52	0.42	0.42										
CAS							1	0.51	0.51										
θ_{CAR}								1	1.00	0.44									
α									1	0.44									
MA										1	0.35		0.35						
GGe											1		1.00	-0.51	0.39	0.33	0.26	0.35	0.48
ρ_{max}												1				0.29	-0.24	-0.26	
ρ_R													1	-0.51	0.39	0.33		0.34	0.48
S														1	-0.57	-0.47	-0.41	-0.50	-0.67
θ_{CC}															1	0.73	0.79	0.79	0.97
θ_{PMP}																1			0.70
θ_{AD}																	1	0.98	0.79
CAD																		1	0.89
CCr																			1

IEA = Índice de estabilidade de agregados, IEE = Índice de estabilidade estrutural, EST = Estoque de carbono, ρ = Densidade do solo, Mi = Microporosidade, K_θ = Condutividade hidráulica saturada, CAS = Capacidade de aeração do solo, θ_{CAR} = Capacidade de aeração relativa, α = Porosidade total calculada, Ma = Macroporosidade, GGe = Grau de compactação estimado, ρ_{max} = Densidade máxima do solo, ρ_R = Densidade relativa do solo, S = índice S, θ_{CC} = Capacidade de campo, θ_{PMP} = Ponto de murcha permanente, θ_{AD} = Água disponível, CAD = Capacidade de água disponível, CCr = Capacidade de campo relativa. Obs: Apresentaram-se apenas os valores de correlação significativos ($p < 0,05$).

Outros autores verificaram efeito negativo da densidade do solo sobre os atributos físicos do solo, a destacar os trabalhos de Stone e Silveira (2001) e Stone et al. (2008). Outros valores de correlação moderada foram encontrados entre as variáveis: densidade do solo x condutividade hidráulica saturada ($r = 0,42$), ρ x CAS ($r = -0,50$) e ρ x MA ($r = -0,44$). Verifica-se na Tabela 22, que o índice S não apresenta correlação com a densidade do solo, comportamento diferente do verificado por Assis et al. (2009), onde o índice S apresentou correlação negativa com a densidade do solo, por ser o primeiro, um atributo dependente da qualidade estrutural do solo.

Cunha et al. (2011) encontrou valor de correlação negativa ($r = -0,96$) entre densidade do solo e índice S, ocasionado pela redução da qualidade estrutural do solo. Valores moderados também foram verificados entre a capacidade de campo relativa e a porosidade total do solo com a capacidade de aeração do solo ($r = 0,51$); são atributos importantes para o funcionamento do solo e estão diretamente relacionando às mudanças estruturais, CAS por atuar na difusão de gases próxima as raízes do solo e α , que além de atuar sobre a difusão de gases, também atua no movimento de água, na ação dos microrganismos e no acúmulo de carbono no solo (KRAVCHENKO et al., 2019).

Para a profundidade de 0,10-0,20 m, os valores de correlação entre os atributos físicos do solo (Tabela 20), verificou-se valores de correlação negativa moderada entre os seguintes atributos IEE x CAS ($r = -0,57$), IEE x ponto de murcha permanente ($r = -0,51$), estoque de carbono x densidade máxima do solo ($r = -0,64$), estoque de carbono x S ($r = -0,59$) e grau de compactação x densidade máxima do solo ($r = -0,66$), densidade do solo x microporosidade ($r = -0,55$) e densidade x condutividade hidráulica saturada ($r = -0,68$). Valores de correlação negativa forte foram verificados entre os seguintes atributos físicos: densidade do solo x capacidade de aeração relativa ($r = -0,99$), densidade do solo x porosidade total ($r = -0,99$) e microporosidade x macroporosidade $r = (-0,83)$, todos significativos a ($p < 0,05$).

Comportamento semelhante foi verificado para as correlações positivas, a destacando-se as classificadas como fortes: capacidade de aeração do solo x porosidade total ($r = 1,00$), densidade relativa x grau de compactação do solo ($r = 0,82$), capacidade de campo x água disponível ($r = 0,80$), θ_{CC} x CAD ($r = 0,81$), θ_{CC} x CCr ($r = 0,97$), capacidade de água disponível x água disponível ($r = 0,98$), capacidade de campo relativa x água disponível ($r = 0,76$) e capacidade de água disponível x capacidade de campo relativa ($r = 0,82$). Destaca-se nesse grupo de valores, as correlações de moderada a fortes entre os atributos físico-hídricos do solo, estando eles intrinsecamente ligados.

Tabela 20. Correlação de Pearson para atributos físicos de Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba. (0,10 – 0,20 m).

	IEA	IEE	ESTC	ρ	Mi	K _θ	CAS	θ_{CAR}	α	MA	GCE	ρ_{max}	ρ_R	S	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{AD}	CAD	CCr
IEA	1	-0.26	-0.27								-0.39								
IEE		1	0.53				-0.57									-0.51			
ESTC			1				-0.22				0.63	-0.64	0.41	-0.59					
ρ				1	-0.55	-0.68	-0.49	-0.99	-0.99					-0.37					
Mi					1	0.39	0.52	0.56	0.56	-0.83	0.30		0.53						
K _θ						1		0.65	0.65		0.37	-0.28	0.33	-0.32					
CAS							1	0.46	0.46	-0.28									
θ_{CAR}								1	1.00				0.38						
α									1				0.38						
MA										1			0.34						
GCE											1	-0.66	0.82	-0.47	0.31		0.34	0.40	0.38
ρ_{max}												1		-0.34	0.69				
ρ_R													1						0.28
S														1	-0.22		-0.32	-0.36	-0.26
θ_{CC}															1	0.66	0.80	0.81	0.97
θ_{PMP}																1			0.65
θ_{AD}																	1	0.98	0.76
CAD																		1	0.82
CCr																			1

IEA = Índice de estabilidade de agregados, IEE = Índice de estabilidade estrutural, EST = Estoque de carbono, ρ = Densidade do solo, Mi = Microporosidade, K_θ = Condutividade hidráulica saturada, CAS = Capacidade de aeração do solo, θ_{CAR} = Capacidade de aeração relativa, α = Porosidade total calculada, Ma = Macroporosidade, CGe = Grau de compactação estimado, ρ_{max} = Densidade máxima do solo, ρ_R = Densidade relativa do solo, S = índice S, θ_{CC} = Capacidade de campo, θ_{PMP} = Ponto de murcha permanente, θ_{AD} = Água disponível, CAD = Capacidade de água disponível, CCr = Capacidade de campo relativa. Obs: Apresentaram-se apenas os valores de correlação significativos ($p < 0,05$).

O grau de compactação do solo (GCe) se correlacionou de forma positiva com a densidade relativa do solo, isso acontece por que, para se obter os valores de GCe é preciso usar ρ_R , que são parâmetros importantes na avaliação da qualidade física do solo. Em relação a microporosidade, observa-se correlação negativa moderada entre a ρ e M_i ($r = -0,55$) na camada de 0,10-0,20 m, fato importante, já que a M_i é um atributo textural e, sua mudança no solo geralmente é modificada quando há modificações no gradiente textural do solo, através da erosão ou eluviação das partículas de argila.

Possivelmente o aumento de microporosidade com elevação da densidade do solo pode estar relacionada ao impacto da compactação sobre a redução de diâmetro dos Ma, corroborando em aumento de M_i . A densidade do solo é um atributo que apresenta estreita relação com outros atributos do solo, e grande parte das pesquisas converge para o fato de que, com o seu aumento, ocorre diminuição da porosidade total, macroporosidade, condutividade hidráulica, absorção, assim como o consequente aumento da microporosidade e da resistência mecânica à penetração do solo (LIMA et al., 2007).

Além de modificar as propriedades físicas sensíveis ao manejo do solo, a densidade do solo pode comprometer a produtividade dos vegetais, como observado por Vitória et al. (2012) avaliando a correlação linear e espacial entre a produtividade de *Brachiaria brizantha*, densidade do solo e porosidade total em função do sistema de manejo do solo, concluíram que a matéria seca da gramínea reduz com o aumento de densidade do solo. Maia et al. (2018) avaliando a curva de retenção de água no solo em Latossolos, verificaram correlação negativa forte entre porosidade total x densidade do solo ($r = -1,00$) – perfeitamente negativa e ($r = 0,73$) entre densidade do solo e areia, demonstrando assim o efeito positivo do aumento nos teores de areia na elevação da densidade do solo.

Com base em Warrick e Nielsen (1980), para classificar os coeficientes de variação para os atributos do solo (baixo: $< 12\%$; médio: de 12 a $< 60\%$; alto: $\geq 60\%$), verificou-se que os atributos: porosidade total (calculada e estimada), M_i , capacidade de aeração relativa, areia, argila, grau de flocculação, densidade do solo, densidade relativa, grau de compactação, percentual de macroegregados secos, umidade de saturação (θ_s) e COT, apresentaram $CV < 12\%$, portanto apresentam-se como bons indicadores de qualidade do solo, levando-se em consideração o coeficiente de variação dos dados.

5 CONCLUSÕES

Conclui-se que após quatro anos de implantação, os sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta promoveram melhorias significativas nos atributos microporosidade, diâmetro médio ponderado de agregados úmidos e secos, percentual de macro e microagregados secos e elevação nos teores de matéria orgânica e carbono orgânico total.

Os atributos físico-hídricos do solo foram mais sensíveis que os físicos e químicos na explicação da variação do coeficiente de variação, através da análise de componentes principais, com destaque para a capacidade de campo, água disponível, capacidade de campo relativa, ponto de murcha permanente, θ_r – umidade residual e o índice S do solo.

A curva de retenção de água no solo indicou um comportamento bimodal para o solo avaliado, com destaque para a camada de 0,10-0,20 m em função dos maiores valores de água disponível.

Houve melhorias significativas para o diâmetro médio ponderado de agregados úmidos na camada de 0,00-0,10 m e diâmetro médio ponderado de agregados secos na camada de 0,20-0,30 m.

A análise de correlação indicou valores de correlação negativa entre a densidade do solo e a porosidade estrutural do solo (capacidade de aeração, porosidade total e capacidade de aeração relativa do solo).

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, T. L.; SOUZA, L. F. R. A.; CHAVES, A. F.; MOTA, J. C. A. Response function for the S relative index in Cambisol treated with and without bovine liquid biofertilizer. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 2, p. 466-475, 2018.
- ALVES, R. E.; SOUZA, L. F.; QUEIROZ, T. A. F.; LIMA, J. V. A degradação e fragilidade dos solos do sudeste de Goiás: o caso da bacia hidrográfica do Ribeirão da Picada. **Revista Geográfica da América Central**, Heredia, v. 56, n. 1, p. 235-258, 2016.
- ALVES, A. R.; RIBON, A. A.; BACKES, C.; FERNANDES, K. L.; SANTOS, A. J. M.; BARROS, L. R. Indicadores físicos de um Latossolo Amarelo distrocoeso em sistemas de integração na região do Cerrado. **Espacios**, Caracas, v. 38, n. 10, p. 3-12, 2016.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 1, p.111-116, 2011.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L.F.; GODOY, S.G. de. Estimativa da resistência do solo à penetração baseada no índice S e no estresse efetivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 9, p. 932-937, 2013.
- ANGHINONI, G.; TORMENA, C. A.; LAL, R.; ZANCANARO, L.; KAPPES, C. Enhancing soil physical quality and cotton yields through diversification of agricultural practices in central Brazil. **Land Degradation Development**, Ghent, v. 30, n. 1, p. 788-798, 2019.
- ARAÚJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 115-131, 2011.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. C. LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p.187-206, 2012.
- ARRUDA, E. M.; ALMEIDA, R. F.; SILVA JUNIOR, A. C.; RIBEIRO, B. T.; SILVA, A. A.; LANA, R. M. Q. Aggregation and organic matter content in different tillage systems for sugarcane. **African Journal of Agricultural Research**, Abuja, v. 10, n. 4, p. 281- 288, 2015.
- ASPIAZÚ, I.; SEDYAMA, T.; RIBEIRO, J. R. Water use efficiency of cassava plants under competition conditions. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 18, n. 4, p. 699-703, 2010.
- ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J.; MADARI, B. E.; HEINEMANN, A. B. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Agrarian**, Dourados, v. 12, n. 43, p. 57-70, 2019.
- BALBINO, L. C. et al. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1-12, 2011.

BARRETO, H. B. F.; MIRANDA, W. O.; LIRA, J. F. B.; DINIZ FILHO, E. T.; MEDEIROS, J. F. Correlação do índice S com atributos físico-hídricos em solo cultivado no Rio Grande do Norte. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 7, n. 3, p. 87-95, 2014.

BARROS, L. R.; RIBON, A. A.; FERNANDES, K. L.; SOUZA, J. L. O.; CARRECHEL, V.; BACKES, C.; SANTOS, A. J. M.; ALVES, A. R. Integrated managements systems for the improvement of the physical quality of a Cerrado Oxisol. **Australian Journal of Crop Science**, Camberra, v. 12, n. 5, p. 711-716, 2018.

BARTZ, M. L. C.; BROWN, G. G.; ROSA, M. G.; KLAUBERG, F. S.; JAMES, W. S.; DECAENS, T.; BARRETTA, D. Earthworm richness in land-use systems in Santa Catarina, Brazil. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 83, n. 1, p. 59-70, 2014.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p.599-607, 2000.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 681-91, 2010.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 843-849, 2005.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 829-834, 2002.

BONETTI, J. A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; SILVA, G. N. Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 1, p. 104-112, 2015.

BONINI, C. S. B.; LUPATINI, G. C.; ANDRIGHETTO, C.; MATEUS, G. P.; HEINRICH, R.; ARANHA, A. S.; SANTANA, E. A. R.; MEIRELLES, G. C. Produção de forragens e atributos químicos e físicos do solo em sistema integrado de produção agropecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1695-1698, 2016.

BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. **Numerical ecology with R**. New York: Springer, 2011. 306p.

BOSCO, M. R. O. **Efeitos do cloreto de sódio sobre o desenvolvimento e absorção de nutrientes na cultura de berinjela**. 2006. 74p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 2, p. 331-336, 2011.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008. 600p.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

BROCH, D. T.; KLEIN, V. A. Maximum soil density of Entisols as a function of silt content. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 12, p. 1-7, 2017.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1, p. 3-22, 2005.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: USP, 1998. 444p.

BURAK, D. L.; FONTES, M. P. F.; BECQUER, T. Microagregados estáveis e reserva de nutrientes em Latossolo Vermelho sob pastagem em região de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 2, p. 229-241, 2011.

CALONEGO, J. C., ROSOLEM, C. A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1399-1407, 2008.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 121-126, 1995.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, L. M.; BARBOSA, S. M.; SILVA, E. A. Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 58, n. 3, p. 284- 291, 2015.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a Equação Duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 77-86, 2011.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P.; SERAFIM, M. E. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 2, p. 291-302, 2013.

CARMO, F. F.; FIGUEIRÊDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; VIVALDI, L. J.; ARAÚJO, C. G. Frações granulométricas da matéria orgânica em Latossolo sob plantio direto com gramíneas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 420-431, 2012.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. DE; REIS, E. F. DOS; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. de. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas

de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, n. 1, p. 99-105, 1990.

CARTER, M. R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 12, n. 1, p. 37-51, 1988.

CARVALHO, J. S.; KUNDER, R. J.; STOCKES, C. M.; LIMA, A. C. R.; SILVA, J. L. S. Evolução de atributos físicos, químicos e biológicos em solo hidromórfico sob sistema de integração lavoura-pecuária no bioma Pampa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1131-1139, 2016.

CARVALHO, L. A. **Condutividade do solo no campo: As simplificações do método do perfil instantâneo**. 2002. 120p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, São Paulo, 2002.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1153-1155, 2004.

CASSOL, L. C. **Relação solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário na superfície**. 2003. 157p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CASTRO FILHO, C.; HENKLAIN, J. C.; VIEIRA, M. J.; CASÃO JÚNIOR, R. Tillage methods and soil and water conservation in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 3, p. 271-283, 1991.

CASTRO, C. R. T. de; LEITE, H. G.; COUTO, L. Sistemas silvipastoris no Brasil: potencialidades e entraves. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 20, n. 4, p.575-582, 1996.

CAVALCANTI, J. F. A. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco, IPA, 2008. 212p.

CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M.; BUZETTI, S. Alteração nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 997-1003, 1999.

CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; SOUSA, R. O. D.; TIM, L. C. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017.

CHAER, G. M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos**. 2001. 89p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2001.

CHAVES, A. A. A.; LACERDA, M. P. C.; GOEDERT, W. J.; RAMOS, M. L. G.; KATO, E. Indicadores de qualidade de Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 4, p. 446-454, 2012.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 317- 326, 2004.

COCROFT, B.; OLSSON, K. A. Case study of soil quality in south-eastern Australia: Management of structure for roots in duplex soils. In: Gregorich, E. G.; CARTER, M. R. (Eds.). **Soil quality crop production and ecosystems health**. Development in Soil Science. New York: Elsevier, 1997. p. 339-350. (V. 25).

COGO, F.D.; JUNIOR, C.F.A.; ZINN, Y.L.; JUNIOR, M.S.D.; ALCÂNTARA, E.N.; GUIMARÃES, P.T.G. Estoques de carbono orgânico do solo em cafezais sob diferentes sistemas de controle de plantas invasoras. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 3, p. 1089-1098, 2013.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p.777-788, 2005.

CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; SANTOS, D. C. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 4, n. 5, p. 794-800, 2014.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. de F.; LEVIEN, R.; WESP, C. de L. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1301–1309, 2011.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence and uses**. Weinheim: VCH, 1996. 573p.

CORTEZ, J. W.; SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; ARCOVERDE, S. N. S.; OLSZEVSCHIN, N. Atributos físicos do solo em sistemas de adubação e de manejo de resíduos culturais em plantio direto. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 11, n. 42, p. 343-351, 2018.

COSTA J. R. C.; PICCOLO, M. C.; SIQUEIRA NETO, M.; BERNOUX. M. Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 1-12, 2012.

COSTA, L. M.; DRESCHER, M. S. Implications of agricultural management on the epigeic fauna and soil physical properties of clayey oxisol. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 65, n. 5, p. 443-449, 2018.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. S. B.; LONGHINI, V. Z. Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 852-863, 2015.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. dos S. B.; LONGHINI, V. Z. Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 852-863, 2015.

CQFS-RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**, (3. ed.). Passo Fundo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 404p.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 589-602, 2011.

D'ANDRÉA, A.F.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; GUILHERME, L.R.G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 179-186, 2004.

DANIEL, D. E. State-of-the-art: laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. In: **HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND WASTE CONTAMINANT TRANSPORT IN SOIL**. ASTM STP 1142, **Proceedings...** Philadelphia: David E. Daniel and Stephen J. Tratwein, Eds., ASTM, 1994, p. 30-78.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. F.; DE MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função das taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015.

DEXTER, A. R. Soil physical quality part I. Theory, effects, density and organic matter and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, n. 3-4, p. 203- 212, 2001.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A.; RICHARD, G.; RESZKOWSKA. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, n. 3-4, p. 243-253, 2008.

DIAS, P. P. **Variáveis fenométricas e rendimento de grãos do Crambe associado a implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. 2014. 51p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura), Universidade do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2014.

DIEL, D.; BEHLING, M.; FARIAS NETO, A. L.; ISENHAGEN, E. C.C. Distribuição vertical do fósforo em sistemas de cultivo exclusivos de soja e de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 38, p. 639-647, 2014.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, 1994. p.1-20.

DORODNIKOV, M.; BLAGODATSKAYA, E.; BLAGODATSKY, S.; MARHAN, S.; FANGMEIER, A.; KUZYAKOV, Y. Stimulation of microbial extracellular enzyme activities by elevated CO₂ depends on soil aggregate size. **Global Change Biology**, Ghent, v. 15, n. 6, p. 1603-1614, 2009.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curve (SWRC version 2.00). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 191-192, 2000.

DREWRY, J. I.; PATON, R. J. Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. **Australian Journal of Soil Research**, Camberra, v. 43, n. 3, p. 525-531, 2005.

DUARTE, M. L.; SILVA FILHO, E. P.; CAMPOS, N. C. C.; MONTOVANELLI, M. B. C.; MOTA JÚNIOR, R. C. Avaliação da variabilidade espacial da resistência a penetração e teor de água de um solo de terra preta arqueológica. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v. 4, n. 3, p. 200-208, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. **Solos tropicais: Planossolo**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_14_2212200611542.html>. Acesso em: 02 set. 2019.

FARAHANI, E.; ERNANI, H.; KELLER, T. Impact of monovalent cations on soil structure: part II Results of two Swiss soils. **International Agrophysics**, Varsóvia, v. 32, n. 1, p. 69-80, 2018.

FARIA, G. E.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico total e frações da matéria orgânica do solo em diferentes distâncias do tronco do eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, p. 265-277, 2008.

FARIAS NETO, A. L. **Embrapa Agrossilvipastoril: primeiras contribuições para o desenvolvimento de uma agropecuária sustentável**. Sinop: Embrapa Agrossilvipastoril, 2019. 825p.

FASBENDER, H. W.; BORNEMISZA, E. **Química dos suelos com ênfasis em suelos de America Latina**. Costa Rica: IICA, 1987. 420p.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2009. 4 p. (Comunicado Técnico, 69).

- FERREIRA, E. V. O.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A.; CAO, E. G. Concentração do potássio do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 9, p. 16-75-1684, 2009.
- FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 481-493, 2000.
- FILHO, J. F.; SOUZA, A. L. V. O manejo e a conservação do solo no Semiárido baiano: desafios para a sustentabilidade. **Bahia Agrícola**, Salvador, v. 7, n. 3, p. 1-10, 2006.
- FONTENELE, W.; SALVIANO, A. A. C.; MOUSINHO, F. E. P. Atributos físicos de um Latossolo Amarelo sob sistemas de manejo no cerrado piauiense. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 2, p. 194-202, 2009.
- FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 95-106, 2002.
- FRANZLUEBBERS, A. J.; SCHOEMBERG, H. H.; ENDALE, D. M. Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, n. 1-2, p. 303-315, 2007.
- GASSEN, D. N.; GASSEN, F. R. **Plantio direto**. Passo Fundo: Aldeia Sul, 1996. 207p.
- GAZZOLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, M. G. P.; ROSSI, C. Q. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 2, p. 693-704, 2015.
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: I. Physical and Mineralogical Methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 383-409.
- GOL C. The effects of land use change on soil properties and organic carbon at Dagdami river catchment in Turkey. **Journal of Environmental Biology**, Lucknow, v. 30, n. 5, p. 825-830, 2009.
- GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. 2006. 8p.
- GUAN, F.; TANG, X.; FAN, S.; ZHAO, J.; PENG, C. Changes in soil carbon and nitrogen stocks followed the conversion from secondary forest to Chinese fir and Moso bamboo plantations. **Catena**, Amsterdam, v. 133, n. 22, p. 455-460, 2015.
- GUBIANI, P. I.; VAN LIER, Q. J.; DRESCHER, M. S.; MEZZAMO, C.; VEIGA, C. M. C. Relação dentre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 100-108, 2015.

HALL, D. E. M.; REEVE, M. G.; THOMASSON, A. J.; WROGHT, V. F. **Water retention, porosity and density of field soils**. Harpenden: Soil Survey Technology Monograph, v. 9, 1986. 75p.

HALL, D. E. M.; REEVE, M. G.; THOMASSON, A. J.; WROGHT, V. F. **Water retention, porosity and density of field soil**. Rothamsted: Transport and Road Research Laboratory, Soil Survey-Tech Monograph. 1977.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. 771p.

HOFFMANN, W. A.; FRANCO, A. C. Comparative growth analysis of tropical forest Savanna wood plants using phylogenetically independent contrasts. **Journal of Ecology**, Amsterdam, v. 91, n. 3, p. 475-484, 2003.

IWATA, B. F.; LEITE, L. F. C.; ARAÚJO, A. S. F.; NUNES, L. A. P. L.; GHERING, C.; CAMPOS, L. P. Sistemas agroflorestais e seus efeitos sobre os atributos químicos em Argissolo Vermelho-Amarelo do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 7, p. 730-738, 2012.

JARVIS, N. J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling, factors and consequences for water quality. **European Journal of Soil Science**, London, v. 58, n. 1, p. 523-546, 2007.

JUNQUEIRA, K. R.; CORRECHEL, V.; CUSTÓDIO FILHO, R. O.; SANTOS, F. C. V.; JUNQUEIRA, M. F. R. Estabilidade de agregados de um Neossolo Quartzarênico sob pastagem e mata em Baliza, Goiás. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 6, n. 11, p. 1-7, 2010.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. A framework for evaluating physical and chemical indicators. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society American, 1994. p.53-72.

KATO, E.; RAMOS, M. L. G.; VIEIRA, D. F. A.; MEIRA, A. D.; MOURÃO, V. C. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Latossolo Vermelho Amarelo do cerrado, sob diferentes coberturas vegetais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 5, p. 732-738, 2010.

KEMPER, W. D.; CHEPIL W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis** (1. ed.). Madison: American Society of Agronomy. 1965. p. 383-409.

KLEIN, V. A. Densidade relativa – Um indicador de qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, n. 1, p. 26-32, 2006.

KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 150p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1998.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 857-867, 2002.

KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, F. F.; MANING, J. P.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 365-371, 2008.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 1: physical and mineralogical methods** (2. ed.). Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-660.

LAL, R. Soil carbon cequestration impacts on global. **Science**, New York, v. 304, n. 5677, p.1623-1627, 2004.

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, 2007.

LARDY, L. M.; ASSAD, M. L. L.; LAURENT, J. Y. Carbon and phosphorus stocks of clayey Ferralsols in Cerrado native agroecosystems, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 92, p. 147-152, 2002.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005. 352 p.

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragens, a porosidade total e densidade do solo em Pereira Barreto, São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 10, p. 1233-1244, 2015.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP. 2004.

LIMA, C. L. R.; PAULETTI, E. A.; GOMES, A. S.; HARTWING, M. P.; PASSIONOTTO, C. C. Compactação de um Planossolo em função dos sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 12, n. 2, p. 179-181, 2006.

LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, P. C.; OLIVEIRA, R. B.; XAVIER, A. C. Métodos geostatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 931-938, 2008.

LINHARES, J. M. S.; BASTOS, W. R.; JUNIOR, R. F. S.; OLIVEIRA, L. C. S. Variabilidade de atributos físico-químicos e dos estoques de carbono orgânico em Argissolo Vermelho sob sistemas agrofloretais no Assentamento Umari Sul do Amazonas. **Revista Geográfica Acadêmica**, Boa Vista, v.10, n.1, p. 93-117, 2016.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. dos. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1269-1276, 2011.

LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L.H.C. dos; SILVA, E.M.R. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 4, p.1067-1072, 2009.

LOSS, A.; RIBEIRO, E. C.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M. Atributos físicos e químicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril em Santa Teresa, ES. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 5, p. 1347-1357, 2014.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, n. especial, p. 133-146, 2009.

MAGALHÃES, W. A.; FREDDI, O. S.; LANG, A.; WRUCK, F. J.; SILVA, W. M.; SOARES, M. B. Physical-hydraulic soil attributes in an integrated production system with different Paricá forest component arrangement. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 53, n. 3, p. 351-360, 2015.

MAGALHÃES, W. A.; FREDDI, O. S.; WRUCK, F. J.; PETTERM F. A.; TAVANTE, R. F. R. Soil water retention curve and S index as soil physical quality indicators for integrated production systems. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 38, n. 1, p. 64-73, 2018.

MAIA, C. E. Índice S para avaliação da qualidade física de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 10, n. 8, p. 1959-1965, 2011.

MAIA, F. C. O.; BUFON, V. B.; LEÃO, T. P. Retention curves and available water capacity in Latosols. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 38, n. 4, p. 546-552, 2018.

MAIA, F. C. V.; LIMA, S. O.; BENICIO, L. P. F.; FREITAS, G. A.; FURLANI, J. C. Qualidade física do solo após aplicação de lodo de esgoto. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. 4, p. 345-351, 2018.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 11, p. 1135-1139, 2005.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.

MATOS, A. T.; ALMEIDA NETO, O. B.; MATIAS, M. P. Saturação do complexo de trocas de solo oxidico com sódio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 501-506, 2014.

MATOSO, S. C. G.; SILVA, A. N.; PEREIRA, E. C. F.; COLLETA, Q. P.; MAIA, E. Frações de carbono e nitrogênio de um Latossolo VermelhoAmarelo distrófico sob diferentes usos na Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, n. 2, p. 231-240, 2012.

MEDEIROS, B. M. **Atualização da classificação do mapa de solos da Paraíba**. 2018. 38p. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Agronomia), Universidade Federal da Paraíba, Areia, PB, 2018.

MEDEIROS, R. D.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de Arroz. **Ciência & Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 5, p. 940-947, 2005.

MEEK, B. D.; RECHEL, E. R.; CARTER, L. M.; DETAR, W. R. Changes in infiltration under alfalfa as influenced by time and wheel traffic. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 2, p. 238-241, 1989.

MELLEK, J. E.; RIZZI, N. E.; RIBEIRO, J. C.; CORDEIRO, C. C. R. ANDRADE, E. R. Velocidade de infiltração de água em Cambissolo de textura argilosa sob floresta Ombrófila mista, **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 10, n. 19, p. 1923-1938, 2014.

MELO FILHO, J. F.; SOUZA, A. L.V; SOUZA, L. S. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1599-1608, 2007.

MELO, M. L. A.; BATISTA, A. M.; ARAÚJO, G. S. S.; SILVA, B. M.; VIANA, M. C. M. Estabilidade de agregados em solo cultivado com capim tifton 85 sob irrigação e formas de suprimento de N. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 14, n. 25, p. 530-543, 2017.

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PARIZ, C. M.; YANO, E. H.; PEREIRA, F. C. B. Liberação de nutrientes da palhada de forrageiras consorciadas com milho e sucessão com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 183-193, 2015.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 3.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. 285p.

MIELNICZUCK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. Cap.1, p.1-6.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. MAPA. **Plano ABC**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf>>. Acesso em: 02 set. 2019.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. MAPA. **Plano ABC – Agricultura de baixa emissão de carbono**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/plano-abc-agricultura-de-baixa-emissao-de-carbono>>. Acesso em: 02 set. 2019.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Critical Limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 288-298, 2014.

MORAES, S. O. **Heterogeneidade hidráulica de uma terra roxa estruturada**. 1991. 141p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Escola Superior de Agrocultura “Luiz de Queiróz”, Piracicaba, SP, 1991.

MOREIRA, C. R.; GALLETO, P. S.; WEDMANN, R.; ROSA, H. A. Níveis de compactação em pastagem de sistema intensivo e extensivo de produção. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 5, ed. Especial, p. 143-153, 2016.

MOREIRA, W. H.; JUNIOR, E. B.; PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; COSTA, M. A. T.; FRANCO, H. H. S. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 389-400, 2012.

MOTA, J. C. A.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; MORAES, S. O.; NASCIMENTO, I. V.; ALENCAR, T. L. Variabilidade espacial dos parâmetros da equação de Van Genuchten em um Latossolo Vermelho Amarelo. **Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 11, n. 2, p. 92-100, 2017.

MOURA, J. A.; GONZAGA, M. I. S.; ANJOS, J. L.; RODRIGUES, A. C. P.; LEÃO, T. D. S.; SANTOS, L. C. O. Respiração basal e relação de estratificação em solo cultivado com citrus e tratado com resíduos orgânicos no estado de Sergipe. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 2, p. 731-746, 2015.

MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: I. Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy - Soil Science American Journal. 1986. p. 799-823

MUNIZ, L. C.; MADARI, B. E.; TROVO, J. B. F.; CANTANHÊDE, I. S. L.; MACHADO, P. L. O. A.; COBUCCI, T.; FRANÇA, A. F. S. Soil biological attributes in pastures of different ages in a crop-livestock integrated system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1262-1268, 2011.

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; OLIVEIRA, T. P.; SILVA, J. R. M.; PAULINO, L. A. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 18, n. 1, p. 1-10, 2019.

NASCIMENTO, C. D. V.; COSTA, M. C. G.; TOMA, R. S.; MOTA, J. C. A.; MENEZES, A. S.; COOPER, M. Soil structure and porus system in responde to plant components of an agrosilvopastoral system. **Journal of Agricultural Science**, Ottawa, v. 10, n. 5, p. 63-78, 2018.

NASCIMENTO, D. M.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; SILVA, A. H.; FAVARETTO, N.; PARRON, L. M. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 186, n. 1, p. 292-299, 2019.

NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; MACEDO, R. L. G.; MOREIRA, F. M. S.; D'ANDRÉA, A. F. Indicadores biológicos da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no nordeste do estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p.105-112, 2009.

NEVES, C. N. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; CARDOSO, E. L.; MACEDO, R. L. G.; FERREIRA, M. M.; SOUZA, F. S. Atributos indicadores de qualidade do solo em sistema agrossilvipastoril no noroeste do estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 74, n. 1, p. 45-53, 2007.

NICODEMO, M. L. F.; BORGES, W. L. B.; SOUZA, I. M. D. Atributos físicos do solo em quatro sistemas de uso da terra em São Carlos, SP. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 2, p. 1-7, 2018.

NIERO, L. A. C.; DECHEN, S. C. F.; COELHO, R. M.; DE MARIA, I. C. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo Vermelho distroférico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1271 -1282, 2010.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NUNES, R. S.; LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; MENDES, I. C. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em Latossolo de Cerrado com a sucessão soja-milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 1407-1419. 2011.

OLDFIELD, E. E.; WOOD, S. A.; BRADFORD, M. A. Direct effects of soil organic matter on productivity mirror those observed with organic amendments. **Plant and Soil**, Genève, v. 423, n.1-2, p. 363-373, 2018.

OLIVEIRA, D. G.; REIS, E. F.; MEDEIROS, J. C.; MARTINS, M. P. O.; UMBELINO, A. S. Correlação espacial de atributos físicos do solo e produtividade de tomate industrial. **Revista Agro@mbiente on-line**, Boa Vista, v. 12, n. 1, p. 1-15, 2018.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de Manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004.

OLIVEIRA, G. C.; SILVA, É. A.; CARDUCCI, C. E.; BARBOSA, S. M.; SILVA, B. M. Indicadores de qualidade física para Argissolos sob pastagens nas regiões leste e sul de Minas Gerais. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 58, n. 4, p. 388- 395, 2015.

OLIVEIRA, M. I. L. de; BECQUER, T.; GOEDERT, W. J.; VILELA, L.; DELEPORTE, P. Concentração de íons na solução de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1291–1300, 2011.

OLNESS, A.; CLAPP, C. E.; LIU, R.; PALAZZO, A. J. Biosolids and their effects on soil properties. In: WALLACE, A.; TERRY, R. E. (Eds.). **Hand book of soil conditioners**. New York: Marcel Dekker. 1998. p. 141-165.

PACHECO, L.P.; TERRA, F.D.; LAROCA, J.V. dos S. Soil quality indicators after conversion of “murundu” fields into no-tillage cropping in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 54, n. 1, p. 1-9, 2019.

PAULETTO, E. A.; BORGES, J. R.; SOUSA, R. O.; PINTO, J. F. S.; SILVA, J. B.; LEITSKE, V. W. Avaliação da densidade e da porosidade de um Gleissolo submetido a diferentes sistemas de cultivo e diferentes culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 11, n. 2, p. 207-210, 2005.

PEDROTTI, A. **Avaliação da compactação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo**. 1996. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1996.

PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1515-1526, 2010.

PEZARICO, C. R.; VITORINO, A. C. T.; MERCANTE, F. M.; DANIEL.O. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 1, p. 40-47. 2013.

PIERI, J. C. M. G. **Fertility of soils: A future for farming in the west African Savannah**. Berlin: Springer-Verlog, 1992. 384p.

PIFFER, C. R.; BENEZ, S. H. Demanda energética de uma semeadora de fluxo contínuo em três sistemas de manejo do solo. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 24, n. 4, p. 21-32, 2009.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Ambi-água**, Taubaté, v. 4, n. 2, p. 188-199, 2009.

PINHEIRO, R. J. B.; NUMMMER, A. V.; RAUBER, A. C. Determinação da condutividade hidráulica das principais unidades geológico-geotécnicas de Santa Maria – RS. **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 347-363, 2007.

PONTONI, D. R.; SCHNEIDER, T.; ADAMUCIO, J. G.; BORGO, J. D. H. Caracterização da estabilidade de agregados, estrutura e penetrometria de um Latossolo sob manejo convencional. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 6, n. 11, p. 387-393-7, 2010.

POTT, C. A.; BARETA JÚNIOR, E.; MÜLLER, M. M. L.; GENÚ, A. M.; SANDINI, I. E.; KRAMER, L. F. M. Qualidade física do solo e produtividade da cultura do feijoeiro em sistema de integração lavoura-pecuária. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 7, n. 3, p. 85-98, 2018.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013.

RAMOS, F. T.; RAMOS, D. T.; AZEVEDO, E. C.; MAIA, J. C. S.; ROQUE, M. W. Agregados de um Latossolo Vermelho Amarelo avaliados por meio do método seco e úmido. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 10, n. 19, p. 2935-2950, 2014.

RANGEL, J. H. de A.; MUNIZ, E. N.; MORAES, S. A.; SOUZA, S. F.; AMARAL, A. J.; PIMENTEL, J. C. M. Integração lavoura pecuária floresta na região Nordeste do Brasil. **Ciência Veterinária Tropical**. Recife, v. 19, n. 3, p.75-84, 2016.

REDE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA. REDE ILPF. **iLPF em Números**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/rede-ilpf/ilpf-em-numeros>>. Acesso em: 02 set. 2019.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. Viçosa, v. 12, n. 3, p. 211-216, 1988.

REICHERT, J. M.; PEIVA, T. A.; REINERT, D. J.; SILVA, V. R Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade da soja em várzea sistematizada: Análise geoestatística e de regressão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 981-988, 2008.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, M. J.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de Densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; FOX, C. A.; TAN, C. S.; ZHANG, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, n. 1-2, p. 316-330, 2007.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; TAN, C. S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, n. 3-4, p. 466-474, 2008.

RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210p. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RIBEIRO, P. L.; BOMBERG, A. L.; REIS, D. A.; OLUVEIRA, C. C. B. Condições físico-hídricas de Planossolo cultivado com soja em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1484-1451, 2016.

RICHARDS, L. A. Pressure-membrane apparatus, conduction and use. **Agricultural Engineering**, Madison, v. 28, n. 10, p. 451-454, 1947.

RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. **Soil Science**, Madison, v. 56, n. 5, p. 331-339, 1943.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, D. R.; LANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

ROLSTON, D. E.; BIGGAR, J. W.; NIELSEN, D. R. Effect of salt on soils. **Califórnia Agriculture**, Davis, v. 36, n. 10, p. 11-13, 1984.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. 2010. 30p.

ROQUETTE, J. G. Distribuição da biomassa no Cerrado e sua importância na armazenagem de carbono. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 3, p. 1350-1363, 2018.

ROSA, H. A.; FONTANA, W. C.; RESENDE, J. D. Desenvolvimento inicial do trigo em diferentes densidades do solo. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, Curitiba, ed. Especial, p. 1-10, 2019.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente ExcelTM para os cálculos de balanços hídricos: Mensal sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Use of S-index as a structural quality indicator for a compacted Latosols cultivated with maize. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 2, p. 455-465, 2018.

ROSSETTI, K. V.; CONTURION, J. F. Compactação em Latossolo cultivado com milho submetido a diferentes pressões induzidas por trator. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, v. 15, n. 1, p. 21-21, 2017.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações orgânicas e índice de manejo de carbono do solo em Latossolo Vermelho sob plantio de soja no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 7, n. 2, p. 233-241. 2012.

SÁ, J. C. M.; FERREIRA, A. O.; BRIEDIS, C.; VIEIRA, A. M.; FIGUEIRÊDO, A. G. Extração de nutrientes e produtividade de genótipos de milho afetados por níveis de palha. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 37, n. 4, p. 715-722, 2011.

SÁ, J. C. M.; LAL, R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 4, p. 46-56, 2009.

SALES, A.; SILVA, A. R.; VELOZO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M.; MIRANDA, B. M. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia legal. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2018.

SALIMON, C. I. **Respiração do solo sob florestas e pastagens na Amazônia sul-oriental**. 97f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2003.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BOCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistema de integração Lavoura-Pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1343-1356, 2011.

SANTOS, F. C.; VIANA, J. H. M.; PAIVA, C. A. D. et al. **Caracterização química, física e microbiológica de solo arenoso no sudoeste baiano**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019. 42p. (Documento, n. 232).

SANTOS, F.; RAMALHO, L. S.; MARQUES, T. A.; SENA-SOUZA, J. P.; REATO, A.; MARTINS, E. S.; COUTO, A. F.; NADOTO, G. B. **Teor de carbono orgânico e aspectos**

bioquímicos de cobertura vegetal na bacia do córrego Sarandi, Planaltina, DF.

Planaltina: Embrapa Cerrado. 2014. 29p.

SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M. BECQUER, T. Qualidade física do dolo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1339-1348, 2011.

SANTOS, H. G. S.; FIDALGO, E. C. C.; ÁGLIO, M. L. D. **Extensão e distribuição de solos no Brasil: Planossolo**. Disponível em:

<<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fesi63xh02wx5eo0y53mhyx67oxh3.html>>. Acesso em: 02 set. 2019.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. Á.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5. ed. Brasília, Embrapa, 2018. 356p.

SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; SPERA, S. T.; TOMM, G. O. Efeito de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP) sobre a fertilidade do solo em plantio direto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 4, p.719-727, 2009.

SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; SPERA, S. T.; DREON, G. Fertilidade e teor de matéria orgânica do solo em sistemas de produção com integração lavoura e pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 3, p.474-482, 2011.

SANTOS, J. D. L.; ALMEIDA, J. N.; SANTOS, A. C. Caracterização física e química de um Planossolo localizado no semiárido baiano. **Agropecuária Científica no semiárido**, Patos, v. 9, n. 3, p. 13-17, 2013.

SANTOS, K. F.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; WERNER, R. S.; WOLSCHICK, N. H.; MOTA, J. M. Teores e estoque de carbono orgânico do solo em diferentes usos da terra no planalto sul de Santa Catarina. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 18, n. 2, p. 222-229, 2019.

SANTOS, L. N. S.; PASSOS, R. R.; SILVA, L. V. M.; OLIVEIRA, P. P.; GARCIA, G. O.; CECÍLIO, R. A. Avaliação de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes coberturas vegetais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, p. 940-947, 2010.

SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G. da.; ARAÚJO, L. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; VALLE, C. B. do.; PEZZOPANE, C. G. Responde mechanisms of *Brachiaria brizantha* cultivars to water deficit stress. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 42, n. 11, p. 767-773, 2013.

SANTOS, T. R.; LEANDO, W. M.; MIRANDA, R. F. ANTUNES JÚNIOR, E. J.; CARDOSO, R. M. Impacto da densidade do solo sobre o crescimento de variedades de milho. **Multi-Science Journal**, Urutaí, v. 1, n. 13, p. 1-11, 2018.

SANTOS, V. L. S.; SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; BERBARA, R. L. L. Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares e glomalina em ecossistemas de mata-seca, Brasil. **Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias**, La plata, v. 117, n. 1, p. 13-21, 2018.

SCHAEFER, C. E. R.; SILVA, D. D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F. F.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; ALBUQUERQUE, M. A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 5, p. 669-678, 2002.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e seus níveis de compactação de um Latossolo argiloso**. 2014. 51p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2014.

SEKI, K. SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. **Hydrological Earth System Sciences**, Munich, v. 4, n.1, p. 407-437, 2007.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; LIMA, J. M.; SILVA, B. M.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 3, p. 362-370, 2013.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, A. S.; LIMA, J. M.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSTA, J. C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: um estudo de caso. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 6, p. 964-977, 2011.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, n. 4, p. 224-234, 1999.

SILVA JÚNIOR, M. L. DA; DESJARDINS, T.; SARRAZIN, M.; MELO, V. S. de; MARTINS, P. F.; SANTOS, E. R.; CARVALHO, C. J. R. de. Carbon content in Amazonian Oxisols after Forest conversion to pasture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6. p.1603-1611, 2009.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. A. C. Atributos físicos e disponibilidade de carbono do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, homogêneo e Santa Fé, no estado do Pará, Brasil. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia, v. 37, n. 1, p. 96-104, 2016.

SILVA, A. S.; SILVA, I. F.; FERREIRA, L. E.; BORCHARTT, L.; SOUZA, M. A.; PEREIRA, W. E. Propriedades físicas e químicas em diferentes usos do solo no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1064-1072, 2013.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SILVA, É. A.; OLIVEIRA, L. M.; SERAFIM, M. E. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 338-345, 2012.

SILVA, E. A. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; ROCHA, J. V.; SOUZA, E. G. 2003. Um estimador busto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos do solo e planta. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 365-371.

SILVA, É. A. **Propriedades físico-hídricas do solo e desenvolvimento radicular do cafeeiro**. 111p. Tese (Doutorado em Ciência do solo), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

SILVA, É. A.; BENEVENUTE, P. A. N.; MELO, L. B. B. Qualidade física de um Latossolo estimada por estudos de curvas de retenção de água, indicadores de fácil determinação e índice S. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v. 11, n. 4, p. 49-54, 2017.

SILVA, E. F.; LOURENTI, E. P. R.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, F. M.; FERREIRA, A. K. T.; FUJII, G. C. Frações lábeis da e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1321-1331, 2011.

SILVA, E. N. S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREIA, A. R.; TOMZA, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 598-607, 2015.

SILVA, G. F.; SANTOS, D.; SILVA, A. P.; SOUZA, J. M. Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do Agreste paraibano. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 3, p. 25-35, 2015.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 113-117, 1997.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017p.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 544-552, 2005.

SILVA, M. L. N.; LIBARDI, P. L.; GIMENES, F. H. S. Soil water retention curve as affected by sample height. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, n. 1, p. 1-13, 2018.

SILVA, M. P.; A. R. F., O.; SÁ, M. E.; ABRANTES, F. L.; BERTI, C. L. F.; SOUZA, L. C. D. Plantas de cobertura e qualidade química e física de Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 12, n. 1, p. 60-67, 2017.

SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; TAVARES, D. D.; NÓBREGA, C. C.; AMARAL, A. J. Water availability under integrated crop-livestock-forestry systems in Agreste region of Paraíba, Brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 32, n. 2, p. 449-457, 2019.

SILVA, R. R.; SILVA, M. L. N.; FERREIRA, M. M. Atributos físicos indicadores de qualidade do solo sob sistema de manejo na bacia do alto do Rio Grande – MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 719-730, 2005.

SILVA, T. L.; NETTO, A. O. A.; GONZAGA, M. I. S.; PACHECO, E. P.; SILVA, T. O.; CARVALHO, C. M. Soil chemical quality in integrated agricultural áreas. **Agrária**, Recife, v. 14, n. 1, p. 1-8, 2019.

SILVA, V.; L.; B.; MARTINS, P. F. S. Propriedades físicas do solo e sistema radicular do cafeeiro, variedade conilon, sob diferentes espaçamentos. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 53, n. 1, p. 96-101, 2010.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.; SA, J. C. M.; ALBRECHT, A. Soil carbon matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no tillage. **Agronomie**, Genève, 22, n. 7, p. 755-775, 2002.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; CUNHA, J. M.; SANTOS, L. A. C.; FONSECA, J. S.; SOUZA, Z. M. Atributos físicos do solo em área sob diferentes sistemas de uso na região Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Belém, v. 59, n. 1, p. 9-15, 2016.

SOBRAL, L. F.; BARRETTO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. **Guia prático para interpretação de resultados de análise de solos**. Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 15p.

SOIL SURVEY SATAFF. **Keys to soil taxonomy**. Washington: Natural Resources Conservation Service, 10. Ed. 1993. 80p.

SOUSA NETO, E. L.; ANDRIOLI, I.; ALMEIDA, R. G.; MACEDO, M. C. M.; LAL, R. Physical quality of an Oxisol under an integrated crop-livestock-forest system in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 608-618, 2014.

SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI R. B.; NEVES, J. C. L. (Editores). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 206-274.

SOUZA, E. D. de; COSTA, S. E. V. G. de A.; ANGHINONI, I.; LIMA, C. V. S. de; CARVALHO, P. C de F.; MARTINS, A. P. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 79-88, 2010.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B. Atributos físicos de um Neossolo de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 163-170, 2006.

SOUZA, E.D. de; SILVA, C.R.M. da; PINTO, F.A.; CARNEIRO, M.A.C.; PAULINO, H.B.; SOUZA, H. S.; TSUKAMOTO FILHO, A. A.; SOUZA, E. C. ARRIEL, D. A. A.; MEDEIROS, R. A. Análise multivariada de atributos químicos e físicos do solo em sistema groflorestal com teca. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 19, n. 1, p. 87-93, 2018.

SOUZA, J. M.; BONOMO, R.; BONOMO, D. Z.; PIRES, F. R. Índice S em solo subsolado da região dos Tabuleiros Costeiros, ES. **Revista Magistra**, Cruz das Almas, v. 27, n. 1, p. 14-22, 2015.

SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E.; ECOSTEGUY, P. A. V.; SANTOS, H. P.; FIGUEROA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. especial, p. 2613-2620, 2008.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeito de integração entre lavoura e pecuária, sob plantio direto, em alguns atributos físicos do solo após dez anos. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 3, p. 695-704, 2010.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

STEINER, F.; LOZ, T.; PINTO JÚNIOR, A. S.; COSTAGNARA, D. D.; DRANSKI, J. A. L. Effects of aluminium on plant growth and nutrient uptake in young physic nut plants. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 1779-1788, 2012.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. New York: John Wiley, 1994. 496 p.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS, 2002. 126p.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, 2007.

SUZUKI, L. E. A. S.; LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; PILLON, C. N. Estrutura e armazenamento de água em um Argissolo sob pastagem cultivada, floresta nativa e povoamento de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 94-106, 2014.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, J.M. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. **Soil Research**, Canberra, v. 51, n. 4, p. 311-321, 2013.

SUZUKI, R.; TAKEDA, S.; THEIN, H. M. Chrono sequence changes in soil properties of teak (*Tectona grandis*) plantations in the Bago Mountains, Myanmar. **Journal of Tropical Forest Science**, Kepong, v. 19, n. 4, p. 207-217, 2007.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Manual de métodos e análise de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

THORNTWAITE, C. W.; MATHER, R. J. **The water balance**. New Jersey: Laboratory of Climatology, 1955. 144p.

TIVET, F.; SÁ, J. C. D. M.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; BORSZWSKEI, P. R.; SANTOS, J. B.; FARIAS, A.; EURICH, G.; HARTMAN, C. D.; JUNIO, M. N. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 126, n. 1, p. 203-218, 2013.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de um Latossolo Vermelho após 10 anos sob dois

sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1023-1031, 2004.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. D. C.; DEXTER, A. R. Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 1, p. 56-60, 2008.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 573-581. 1998.

UNCCD. United Nations Convention to Combat Desertification and Drought. **Global land outlook**. Disponível em: <www.unccd.int>. Acesso em: 09 set. 2019.

URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; NEVES, M. C. P. A necessidade de uma revolução mais verde. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUINI, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p.175-181.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity on unsaturated soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 892-897, 1980.

VAN LIER, Q. J. Carta ao editor: índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1361-1365, 2012.

VAN LIER, Q. J.; GUBIANI, P. I. Beyond the “Least Limiting Water Range”: rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 925-939. 2015.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 1, p. 175-180, 1994.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 124p.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 213- 223, 2011.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 743-755, 2009.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. **O solo como sistema**. Curitiba: Ed. dos autores, 2011. 104p.

VICENTE, T. F. S.; PRCHOSA, E. M. R.; ROLIM, M. M.; OLIVEIRA, V. S.; OLIVEIRA, A. K. S.; SOUZA, A. M. P. L. Relações de atributos do solo e estabilidade de agregados em

canaviais com e sem vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 12, p. 1215-1222, 2012.

VILELA, L.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; MACEDO, M. C. M.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G. A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1127-1138, 2011.

VITÓRIA, E. L.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; LACERDA, E. G. Correlação linear e espacial entre produtividade de *Brachiaria brizantha*, densidade do solo e porosidade total em função do sistema de manejo do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 2, n. 4, p. 909-919, 2012.

WADT, P. G. S. **Práticas de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas**. Rio Branco: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2003. 32p.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WATTS, C.W.; DEXTER, A. R. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 42, n. 1, p. 253-275, 1997.

WILKINSON, S. R.; LOWERY, R.W. Cycling of mineral nutrients in pasture ecosystems. In: BUTTLER, G.W.; BALLEY, R.W. (Eds.). **Chemistry and biochemistry of herbage**. New York, Academic Press, 1973. p. 247-315.

ZAMBONI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. C. Teores de Al trocável após calagem e gessagem em Latossolo sob plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 3, p. 487-495, 2007.

ZONTA, J. H.; FOIATI, V.; SILVA, O. R. R. F.; RAMOS, E. N.; BARBOSA, H. F.; CORDEIRO JÚNIOR, A. F.; LIRA, A. J. **Sistema de integração lavoura-pecuária (iLP) para a região Agreste do Nordeste**. Campina Grande: Embrapa Algodão. 2016. 26p.

